

航空保障装备系统工程

张 亮 史 超 车 飞 王坚浩 著

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 • BEIJING

内 容 简 介

本书是在全面总结系统工程、装备保障领域的相关研究成果,以及近几年作者在航空保障装备方面研究与实践的基础上编写完成的。本书主要包括:航空保障装备系统工程的概念、过程模式,航空保障装备体系结构与型谱优化,航空保障装备数量配置,规划及使用阶段航空保障装备效能评估和综合评估等。本书提出的思想观点、技术方法对其他类型保障装备也有较好的借鉴和参考作用。

本书可供航空装备管理机构及论证、研制、生产、部署使用的管理与工程技术人员阅读和参考;也可供高等院校相关专业研究生、本科生阅读参考。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。
版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

航空保障装备系统工程/张亮等著. —北京:电子工业出版社, 2018.10
ISBN 978-7-121-35165-5

I. ①航… II. ①张… III. ①航空装备—保障体系—研究 IV. ①E154

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 228205 号

策划编辑:刘小琳

责任编辑:刘小琳 特约编辑:刘 炯

印 刷:

装 订:

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本:787×1092 1/16 印张:9.5 字数:223.5 千字

版 次:2018 年 10 月第 1 版

印 次:2018 年 10 月第 1 次印刷

定 价:49.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系,联系及邮购电话:(010) 88254888, 88258888。

质量投诉请发邮件至 zltz@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

本书咨询联系方式:(010) 88254538, liuxl@phei.com.cn。

■ 前 言

PREFACE

航空保障装备，又称为航空保障设备，是实施航空装备保障的重要资源，是保持和恢复航空装备完好性和技术性能的重要物质基础，对于提高航空装备的维修质量和保障的时效性、经济性，以及增强战斗力具有重要作用。随着航空装备的快速发展、实战化训练转型的不断推进，航空保障装备“不好用”“尾巴长”“养不起”的问题日益凸显。为有效解决航空保障装备的问题，需要从系统层次上运用系统工程的理论、技术和方法，统筹协调解决各种问题和矛盾，解决这些问题的最佳途径就是航空保障装备系统工程。

全书以“系统工程的理论、技术和方法”为基本视角，以航空保障装备体系化建设、型谱化发展、精确化配置、科学化评估为问题需求切入点，对航空保障装备系统工程的概念、过程模式与关键技术方法进行了深入研究。

全书共 8 章，第 1 章论述了航空保障装备系统工程的产生背景、概念及基本方法论；第 2 章从系统工程过程与管理的角度，论述了航空保障装备论证、研制、使用管理、作战运用等过程模式；第 3 章运用能力需求论证理论和 DoDAF 2.0 视图分析方法，研究了航空保障装备体系结构设计；第 4 章构建了航空保障装备型谱重要度评估指标体系，提出基于重要度评估和多种群遗传算法的航空保障装备型谱优化方法；第 5 章研究了航空保障装备数量配置的各种典型方法，提出了数量配置方法运用的逻辑决策模型；第 6 章研究了基于仿真的规划阶段航空保障装备方案效能评估流程框架和算法策略；第 7 章研究了基于数据包络分析（DEA）的使用阶段航空保障装备效能综合评估方法；第 8 章对全书进行了总结归纳，对下一步工作进行了展望。

全书由张亮、史超、车飞、王坚浩共同撰写，第 1、2、3、6 章由张亮撰写，第 4 章由王坚浩撰写，第 5 章由车飞撰写，第 7 章由史超撰写，第 8 章由张亮、史超、车飞、王坚浩撰写。全书由张亮负责统稿，史超、车飞、王坚浩负责校对。

本书在编写过程中参阅了大量参考文献，借鉴、引用了部分研究成果，在此对参考文献作者表示诚挚的谢意。本书可供航空装备管理机关和论证、研制、生产、部署使用的管理与工程技术人员阅读和参考；也可供高等院校相关专业研究生、本科生阅读参考。

由于作者知识和经验的局限性，本书的缺点和错误在所难免，恳请读者批评指正。

著 者

2018 年 3 月

■ 目 录

CONTENTS

| | |
|--------------------------------|----|
| 第 1 章 绪论 | 1 |
| 1.1 航空保障装备 | 1 |
| 1.1.1 航空保障装备及相关概念 | 1 |
| 1.1.2 航空保障装备的分类 | 2 |
| 1.2 航空保障装备系统工程 | 3 |
| 1.2.1 航空保障装备系统工程的提出 | 3 |
| 1.2.2 航空保障装备系统工程的概念 | 5 |
| 1.2.3 航空保障装备系统工程的主要观点 | 6 |
| 1.2.4 航空保障装备系统工程方法论 | 7 |
| 1.3 国内外相关研究现状 | 11 |
| 1.3.1 美军航空保障装备相关现状 | 11 |
| 1.3.2 民航航空保障装备相关现状 | 13 |
| 1.3.3 相关关键技术研究现状 | 14 |
| 1.4 主要研究内容 | 16 |
| 第 2 章 航空保障装备系统工程过程模式 | 17 |
| 2.1 航空保障装备型谱化发展论证模式 | 17 |
| 2.1.1 航空保障装备型谱化发展基本内涵和策略 | 17 |
| 2.1.2 航空保障装备型谱化发展论证模式 | 19 |
| 2.1.3 航空保障装备型谱化发展论证管理 | 21 |
| 2.2 航空保障装备研制模式 | 21 |
| 2.2.1 典型航空保障装备研制模式 | 21 |
| 2.2.2 航空保障装备联合研制模式 | 23 |
| 2.2.3 航空保障装备竞争研制模式 | 23 |
| 2.3 航空保障装备使用管理模式 | 24 |
| 2.3.1 航空保障装备使用管理活动 | 24 |
| 2.3.2 航空保障装备精细化使用管理模式 | 25 |
| 2.4 航空保障装备作战运用模式 | 26 |

| | |
|---------------------------------|----|
| 2.4.1 航空保障装备作战运用内涵 | 26 |
| 2.4.2 航空保障装备典型作战运用模式 | 27 |
| 第3章 航空保障装备体系结构设计 | 29 |
| 3.1 航空保障装备体系结构设计概述 | 29 |
| 3.2 基于视图分析方法的航空保障装备体系结构设计 | 30 |
| 3.2.1 DoDAF 视图分析方法 | 30 |
| 3.2.2 航空保障装备体系结构设计的视图模型 | 31 |
| 3.3 信息化航空维修保障装备体系结构设计示例 | 35 |
| 3.3.1 示例分析背景 | 35 |
| 3.3.2 信息化航空维修保障任务视图集 | 35 |
| 3.3.3 信息化航空维修保障能力视图集 | 39 |
| 3.3.4 信息化航空维修保障装备视图集 | 42 |
| 第4章 航空保障装备型谱优化 | 44 |
| 4.1 航空保障装备型谱优化概述 | 44 |
| 4.1.1 型谱优化的意义 | 44 |
| 4.1.2 型谱优化流程 | 45 |
| 4.2 航空保障装备型谱重要度评估 | 45 |
| 4.2.1 评估指标体系构建 | 46 |
| 4.2.2 评估信息收集 | 47 |
| 4.2.3 评估指标预处理 | 49 |
| 4.2.4 评估指标赋权 | 51 |
| 4.2.5 综合评估 | 55 |
| 4.3 航空保障装备型谱优化方法 | 56 |
| 4.3.1 型谱优化数学模型 | 56 |
| 4.3.2 基于多种群遗传算法的型谱优化 | 57 |
| 4.4 航空保障装备型谱优化案例 | 61 |
| 4.4.1 案例背景 | 61 |
| 4.4.2 型谱重要度评估 | 61 |
| 4.4.3 型谱优化分析 | 65 |
| 第5章 航空保障装备数量配置 | 67 |
| 5.1 航空保障装备数量配置影响因素分析 | 67 |
| 5.1.1 作战训练任务因素 | 67 |
| 5.1.2 航空装备因素 | 68 |
| 5.1.3 维修保障因素 | 69 |

| | | |
|-------|------------------------------|-----|
| 5.1.4 | 航空保障装备特性因素 | 69 |
| 5.1.5 | 航空保障装备费用因素 | 70 |
| 5.1.6 | 航空保障装备管理因素 | 70 |
| 5.1.7 | 影响因素的因果关系图分析 | 71 |
| 5.2 | 航空保障装备数量配置的一般流程 | 71 |
| 5.2.1 | 初始阶段配置流程 | 72 |
| 5.2.2 | 后续阶段配置流程 | 74 |
| 5.3 | 航空保障装备数量配置的常用方法 | 75 |
| 5.3.1 | 类比法 | 75 |
| 5.3.2 | 估算法 | 76 |
| 5.3.3 | 排队论法 | 77 |
| 5.4 | 航空保障装备数量配置的仿真优化方法 | 79 |
| 5.4.1 | 仿真优化流程 | 79 |
| 5.4.2 | 仿真优化目标 | 79 |
| 5.4.3 | 仿真优化策略 | 81 |
| 5.4.4 | 案例分析 | 81 |
| 5.5 | 航空保障装备数量配置的综合优化方法 | 85 |
| 5.5.1 | 问题描述 | 85 |
| 5.5.2 | 基于粒子群算法的综合优化 | 87 |
| 5.5.3 | 案例分析 | 90 |
| 5.6 | 航空保障装备数量配置方法的选择 | 91 |
| 5.6.1 | 数量配置方法的适应性分析 | 91 |
| 5.6.2 | 数量配置方法的逻辑决策 | 93 |
| 第 6 章 | 规划阶段航空保障装备方案效能仿真评估 | 94 |
| 6.1 | 规划阶段航空保障装备方案效能仿真评估概述 | 94 |
| 6.1.1 | 规划阶段航空保障装备方案效能评估特点 | 94 |
| 6.1.2 | 规划阶段航空保障装备方案效能仿真评估流程 | 95 |
| 6.2 | 规划阶段航空保障装备方案效能仿真评估模型 | 96 |
| 6.2.1 | 任务模型 | 96 |
| 6.2.2 | 功能模型 | 98 |
| 6.2.3 | 活动模型 | 99 |
| 6.2.4 | 资源模型 | 100 |
| 6.2.5 | 组织模型 | 101 |
| 6.2.6 | 目标模型 | 102 |
| 6.3 | 规划阶段航空保障装备方案效能仿真评估算法策略 | 102 |

| | | |
|-------|----------------------------|-----|
| 6.3.1 | 仿真评估流程控制算法策略 | 102 |
| 6.3.2 | 任务过程逻辑算法策略 | 104 |
| 6.3.3 | 保障过程逻辑算法策略 | 105 |
| 6.4 | 规划阶段航空保障装备方案效能仿真评估模型的确认与验证 | 106 |
| 6.4.1 | 仿真评估模型确认 | 106 |
| 6.4.2 | 仿真评估模型验证 | 106 |
| 6.5 | 规划阶段航空保障装备方案效能仿真评估案例 | 107 |
| 6.5.1 | 案例简介 | 107 |
| 6.5.2 | 仿真平台工具 | 109 |
| 6.5.3 | 仿真基本想定 | 110 |
| 6.5.4 | 仿真模型 | 113 |
| 6.5.5 | 仿真数据分析 | 118 |
| 第 7 章 | 使用阶段航空保障装备效能综合评估 | 121 |
| 7.1 | 使用阶段航空保障装备效能综合评估概述 | 121 |
| 7.1.1 | 使用阶段航空保障装备效能综合评估特点 | 121 |
| 7.1.2 | 使用阶段航空保障装备效能综合评估流程 | 122 |
| 7.2 | 使用阶段航空保障装备效能综合评估指标体系 | 123 |
| 7.2.1 | 评估指标体系的构建 | 123 |
| 7.2.2 | 评估指标的计算与集成 | 123 |
| 7.2.3 | 数据需求 | 127 |
| 7.3 | 基于 DEA 的使用阶段航空保障装备效能综合评估 | 127 |
| 7.3.1 | 使用阶段航空保障装备有效性分析 | 127 |
| 7.3.2 | 使用阶段航空保障装备效能的投影改进分析 | 130 |
| 7.3.3 | 使用阶段航空保障装备效能排序 | 131 |
| 7.4 | 使用阶段航空保障装备效能综合评估案例 | 131 |
| 7.4.1 | 案例概述 | 131 |
| 7.4.2 | 评估指标的计算 | 133 |
| 7.4.3 | 航空保障装备有效性分析 | 134 |
| 7.4.4 | 航空保障装备效能的投影改进分析 | 135 |
| 7.4.5 | 航空保障装备效能排序 | 136 |
| 第 8 章 | 总结与展望 | 138 |
| 8.1 | 内容总结 | 138 |
| 8.2 | 研究展望 | 139 |
| 参考文献 | | 141 |

绪论

为克服传统“重主战装备、轻保障装备”的片面认识，有效解决航空保障装备面临的“不好用”“尾巴长”“养不起”等问题，有必要从系统工程科学的角度，推行航空保障装备系统工程，为航空装备与航空保障装备成系统、成建制同步形成作战保障能力提供有效的工程方法。本章主要介绍航空保障装备的概念、分类，航空保障装备系统工程的概念、主要观点和基本方法论，以及相关研究现状。

1.1 航空保障装备

1.1.1 航空保障装备及相关概念

1. 相关概念

在界定航空保障装备概念之前，首先介绍与航空保障装备相近的几个术语，包括保障设备、飞机维修保障设备、航空维修保障装备等。

根据 GJB 5967—2007《保障设备规划与研制要求》中的定义，保障设备是指使用与维修装备所需要的设备，包括测试设备、维修设备、试验设备、计量与校准设备、搬运设备、拆装设备、工具等，是综合保障要素之一。

根据《中国空军百科全书》中的定义，飞机维修保障设备是用于飞机、直升机维修的工具、测试设备、地面保障设备、修理工艺装备、机务专用车辆和方舱等的统称。

根据《中国人民解放军空军军语》中的定义，飞机维修保障设备是用于飞机维修的工具、测试设备、地面保障设备、修理工艺装备、专用车辆和集装箱等的统称。

根据《空军航空维修保障装备管理规定》中的定义，航空维修保障装备是直接或间接用于航空装备维修的各种工具、小型设备、地面保障设备、测试设备、修理工艺装备、专用车辆、方舱和集装箱等的统称。

2. 航空保障装备的概念

考虑到上述概念主要是面向航空维修保障工作，不能覆盖全部航空装备保障工作，因此本书在综合上述概念的基础上，将广义的航空保障装备概念界定为直接或间接用于航空装备保障的各类型保障装备的统称；狭义的航空保障装备就是人们通常理解的航空维修保障装备。

1.1.2 航空保障装备的分类

1. 按照功能用途分类

按照功能用途分类，航空保障装备可以分为维修保障装备、任务支援保障装备、场务保障装备、训练保障装备、弹药保障装备、四站保障装备。

(1) 维修保障装备根据具体功能用途的不同，又可以分为工具、顶支设备、牵引设备、拆装和起吊运输设备、接近和辅助设备、加注充填设备、排故设备、系留设备、防护设备、测试设备、维修支援信息化设备、战伤维修设备、修理工艺设备、机动转场设备等。其中，工具主要是指用于航空装备维修的通用和专用手工工具、辅助工具和刀具等；测试设备主要是指检查、测量和检验航空装备（包括机载设备、机件）功能、技术参数、工作（运转）情况和故障诊断的仪器设备及能源和辅助设备。

(2) 任务支援保障装备主要是指用于作战支援保障任务的航空保障装备，通常包括飞行数据转录与处理设备、任务规划设备、任务加载设备、视频回放设备等。

(3) 场务保障装备是用于机场场务保障的专用车辆、设备和器材的统称，主要包括运输牵引设备、清扫设备、消防设备、驱鸟设备、飞机抢救设备、飞机拦阻设备等。

(4) 训练保障装备是用于空勤、地勤人员训练的保障装备，主要包括各种模拟训练器材。

(5) 弹药保障装备是航空弹药保障的装备、设备、仪器、仪表和专用工程车辆等的统称，具体包括弹药参数装定设备、测试设备、运输设备、装挂设备与油料加注设备。

(6) 四站保障装备是生产或供应航空装备所需气体、电源、空调气源、肼燃料和地面液压源等地面保障装备的统称，具体包括制氧制氮装备、制冷送冷装备、充氧（氮）装备、充（放）电装备、电源车和蓄电池起动车、空调车、油泵车、气源起动车八大类。

2. 其他分类方法

(1) 按照保障装备的通用程度可分为通用航空保障装备和专用航空保障装备。

(2) 按照保障装备配备的维修级别可分为基层级保障装备、中继级保障装备、基地级保障装备。

(3) 按照保障装备的配套状态可分为新研保障装备、改进保障装备和沿用保障装备。

1.2 航空保障装备系统工程

1.2.1 航空保障装备系统工程的提出

伴随航空装备引进、测仿、自研、创新的发展过程,装备综合保障工程理念、方法的深入实践,在需求、技术的双重推动下,配套的航空保障装备的功能、性能越来越先进,复杂程度越来越高,对航空装备作战的支撑作用也越来越明显。然而面对航空装备快速发展和实战化训练转型的现实需求,也逐渐暴露出航空保障装备在发展论证、设计研制、使用管理等方面的诸多问题,对航空装备的战备完好性、任务成功性、保障机动性和经济性水平造成了较大制约。

1. 航空保障装备发展方面的问题

(1) 需求论证方面的问题。一是科研部门对航空保障装备的需求管理有待完善。在型号研制总要求的论证中,目前只有个别新研或较重要的保障装备才提出了具体的研制要求,而其他保障装备的研制要求则未能详细体现。二是使用部门对牵引和约束保障装备研制的相关技术要求过于简单,保障装备装载运输体积控制、采购价格等约束条件不够深入、具体。

(2) 设计方面的问题。一是部分保障装备在设计上未实现多功能的综合,在一定程度上造成了保障装备型号繁多的问题。二是部分保障装备设计形状不规则、难以折叠,造成小件不易集中、大件结构笨重,携运时不能堆积且无法固定,需要占用大量运输飞机、火车、车辆等载体,机动转场时效率低、尾巴长。三是部分专用方舱未根据保障装备的具体情况设计,内部空间划分不尽合理,导致准备时间长、展开速度慢,而且很容易发生“错、忘、漏、损”现象,不满足快速出动要求。

(3) 研制方面的问题。一是部分保障装备研制缺乏有效的竞争机制、过程监管机制,保障装备目录审查较为粗放;二是保障装备的试验鉴定要求和程序不够规范,存在试验环境不够真实、试验时间不充分、试验方案不够完善、鉴定状态不稳定、鉴定手段单一等问题。

2. 航空保障装备能力发挥方面的问题

(1) 航空保障装备机动性不高,不适应远程远海作战训练需求。主要表现为航空保障装备集成化和小型化程度不高,在机动转场驻训时,需要携带大量的一线保障设备和二线检测设备。

(2) 航空保障装备通用性不强,不适应多机种保障需求。部分航空保障装备功能单一,只适用于某一机种(型)的某项保障工作,在一定程度上制约了多机种保障的组织实施。以外挂设备为例,某机型外挂设备包括内侧通用挂架、中部通用挂架、外侧通用挂架、机

身侧挂架、通用吊舱挂架、通用挂架、轻型标准挂架、空舰导弹发射装置、机翼副油箱挂架、机身副油箱挂架等多种型号。不同弹型、种类所需的挂架不同，武器挂架种类繁多，且不同挂架在装机或装挂武器装备时所需的设备不能通用，这导致装挂武器需要耗费大量的人力和物力，直接影响快速出动水平。

(3) 航空保障装备智能化程度低，不适应精确保障需求。作战单元发现故障后，由于缺少自动化的深度检测设备，仅能确定到外场可更换故障件，难以直接隔离到故障件中的具体元器件，导致故障件只能返厂修理，周期长、效率低，影响作战单元修理能力建设。

(4) 航空保障装备寿命周期费用高，不适应经济可承受性要求。伴随航空保障装备数量的增加和技术水平的提升，保障装备采购费用、后期维护费用增大，买得起、养不起的问题逐步暴露。

3. 航空保障装备配备方面的问题

在作战单元作战训练过程中，暴露出部分航空保障装备配备不合理、不精确、不能满足需求等问题。

(1) 部分航空保障装备配备比例不够合理。部分航空保障装备，特别是一线维修保障装备使用频繁，但配备的数量较少，难以满足平时训练和多地保障需求；而部分一线维修保障装备使用次数少但配备较多，造成较大资源浪费。

(2) 部分航空保障装备配备不满足需求。部分航空保障装备，特别是二线检测设备在功能、性能上不能完全满足定检等周期性工作需求，直接影响周期性工作的质量和进度；另外，航空保障装备配备还不成体系，缺少新型材料、结构检测设备及战时常用的抢修工具、机动方舱等。

(3) 机动航空保障装备配备方案不精确。机动携行、预置预储编配需求不精确，导致携行规模大、预置利用率低等情况发生，与实战化作战要求之间的矛盾较为明显。

(4) 部分航空保障装备配备周期长。部分航空保障装备从批准配备到最终交付作战单元的周期较长，配置时间不确定性高，在一定程度上影响了作战训练任务的完成。

4. 航空保障装备管理方面的问题

(1) 航空保障装备修理管理方面。一是由于修理程序复杂、修理质量不高等原因，导致部分航空保障装备修理周期过长，影响作战单元使用。二是部分航空保障装备签订采购合同时，在质量保证服务、修理途径、修理价格、修理经费保障等方面不够明确，导致需要哪级部门负责、哪级工厂修理不明确，需要长时间协调。三是部分承修单位修理不规范，修理好航空保障装备后，只提供设备交接单，没有出具包含故障原因、修理措施、处置方法等具体修理信息的修理单据。

(2) 航空保障装备使用管理方面。一是航空保障装备退役报废管理不科学。部分高价值航空保障装备退役报废缺乏规定的程序，缺少寿命规定，导致作战单元相关保障装备退役报废处理不科学，存在超期服役使用现象。二是航空保障装备信息管理基础薄弱。航空保障装备履历资料格式不统一、信息记录不全面，缺乏有效的信息系统软件支撑，信息管

理存在薄弱环节。三是航空保障装备基层管理维护跟不上。部分航空保障装备的存放和专人管理没有达到标准要求,如一些比较精密的仪器设备,需要存放在规定的温度、湿度环境下,但由于条件限制缺乏必要的储存环境;航空保障装备使用后的维护保养不及时,发现设备故障或损坏不及时,影响下一次使用时的维修保障工作;航空保障装备缺乏对管理人员在维修保养、性能检查等方面的专项培训,管理人员在能力素质上还有一定差距。

从上述分析可以看出,航空保障装备问题涉及论证、设计、研制、生产、采购、使用、退役报废及管理等诸多环节和要素;涉及业务机关管理部门、工业部门、作战单元等相关单位,涉及航空保障装备体系建设;影响了航空装备系统作战保障能力的有效发挥,是一个复杂的系统工程。在传统上只将航空保障装备视作型号航空装备配套保障资源的做法没有真正从作战使用、体系能力建设的视角研究航空保障装备论证、设计、研制和使用问题,没有从根本上树立全系统全寿命管理思想,导致航空保障装备整体效能效益难以有效发挥。因此,有必要将航空保障装备看作一个系统,从用户角度,基于全系统全寿命视角,运用系统工程的理论、技术和方法,实现以“任务完成、装备完好”为中心的“好保障、保障好”目标,这就是航空保障装备系统工程的任务。

1.2.2 航空保障装备系统工程的概念

1. 系统工程概念

我国著名科学家钱学森曾指出:“系统工程是组织管理系统的规划、研究、设计、制造、试验和使用的科学方法,是一种对所有系统具有普遍意义的科学方法。系统工程是一门组织管理的技术。”

美国著名学者切斯纳(Chestnut)指出:“系统工程认为,虽然每个系统都是由许多不同的特殊功能部分组成的,这些功能部分之间又存在联系,但是每个系统都是完整的整体,每个系统都要求有一个或若干个目标,系统工程是按照各个目标进行权衡,全面求得最优解(或满意解)的方法,并使各组成部分能够最大限度地互相适应。”

日本工业标准(JIS)界定:“系统工程是为了更好地达到系统目标,而对系统的构成要素、组织结构、信息流动和控制机制进行分析与设计的技术。”

西安交通大学汪应洛院士认为:“系统工程是从总体出发,合理开发、运行和革新一个大规模复杂系统所需思想、理论、方法论、方法和技术的总称,属于一门综合性的工程技术。”

2. 航空保障装备系统

航空保障装备系统是指为完成一定的航空装备保障任务,由相互独立而又相互协作的若干航空保障装备组成的更高层次的系统。航空保障装备系统对应的实体可大可小,型号航空装备配套的便携式维修辅助设备(PMA)可以视为一个航空保障装备系统,型号航空装备配套的所有航空保障装备集合也可以视为一个航空保障装备系统。航空保障装备系统具有系统的一般属性,即整体性、关联性、环境适应性、目的性和层次性。

由于某个系统是另一更大系统的组成部分，因此航空保障装备系统是航空保障系统的一个子系统，更是航空装备系统的子子系统。

3. 航空保障装备系统工程

航空保障装备系统工程是以航空保障装备系统为研究对象，应用系统工程的理论、技术和方法，从系统的整体目标出发，研究系统的论证、方案、工程研制、试验、生产、使用保障和退役处理问题，以实现系统优化的科学方法。航空保障装备系统工程研究的典型问题贯穿全寿命周期，具体包括：航空保障装备系统（或体系）设计、评估与优化，航空保障装备配置，航空保障装备研制、采购和使用管理，航空保障装备试验鉴定与评估，航空保障装备作战运用等。

1.2.3 航空保障装备系统工程的主要观点

1. 全系统的观点

航空维修保障装备、任务支援保障装备、场务保障装备、训练保障装备、弹药保障装备、四站保障装备、不同维修专业（机械、特设、航电、军械）航空保障装备、内外场航空保障装备构成了航空保障装备系统，它们之间具有有机的联系，是一个不可分割的整体。另外，航空保障装备系统必须与型号航空装备、航空装备体系相匹配，与其他类型航空保障系统相协调，同步考虑、同步设计研制，保证航空保障装备系统在交付使用之时就能形成作战能力。

2. 全寿命的观点

与航空装备一样，航空保障装备的全寿命周期过程也是指从论证阶段开始直到退役处理的整个过程。其中，论证阶段也称为立项论证阶段，主要是提出战术技术要求和论证技术经济可行性，探索各种备选方案。方案阶段也称为初步设计阶段，主要是对备选方案进行分析、评价和确认，以降低风险。工程研制阶段也称为详细设计及研制阶段，它包括详细工程设计、样机研制、保障诸要素研制、试验、评估、鉴定直到能生产的状态为止。生产部署阶段包括制造、安装、调试、验收、培训、配备保障直至交付使用或部署。使用保障阶段包括保管、储存、借用、归还、操作、保养、维修等活动。全寿命的观点要求既要重视后半生航空保障装备的使用、保障工作，更要重视前半生航空保障装备的论证、设计工作；要求按照并行工程的思想，以产品综合组的形式，通盘考虑全寿命周期内的各种需求、矛盾和因素。

3. 以用户为中心的观点

工业部门开展的航空保障装备的论证、设计、研制工作，管理机关和使用部门开展的采购、配备、使用与保障工作，必须以最终用户需求为中心，确保能有效满足作战训练任务要求，保证质量安全，提高效率效益。航空保障装备的最终用户就是部队，部队才是航

空保障装备研发需求的最初提出者，也是航空保障装备使用适应性的最终评判者。

1.2.4 航空保障装备系统工程方法论

航空保障装备系统工程方法论是分析和解决航空保障装备系统论证、设计、研制、生产、采购、部署、使用及管理实践中的问题所应遵循的工作程序、逻辑步骤和基本方法，是航空保障装备系统工程思考问题和处理问题的一般方法与总体框架。

常见的系统工程方法论包括霍尔和切克兰德的系统工程方法论（霍尔三维结构）、美国国防分析研究所提出的并行工程方法学（并行工程思想）、钱学森等提出的综合集成工程方法学、物理—事理—人理（WSR）系统方法论等，本章仅介绍霍尔三维结构和并行工程思想。这里结合航空保障装备特点，进行论述。

1. 霍尔三维结构

系统工程解决的问题具有时间性、空间性和层次性。为了认识和描述要研究的问题，美国学者霍尔等人在大量工程实践的基础上，于 1969 年提出了霍尔三维结构。霍尔三维结构集中体现了系统工程方法的系统化、综合化、程序化和标准化等特点，是系统工程方法论的重要基础内容。同样作为一个系统工程问题，航空保障装备系统工程也可以用霍尔三维结构进行描述，如图 1-1 所示。

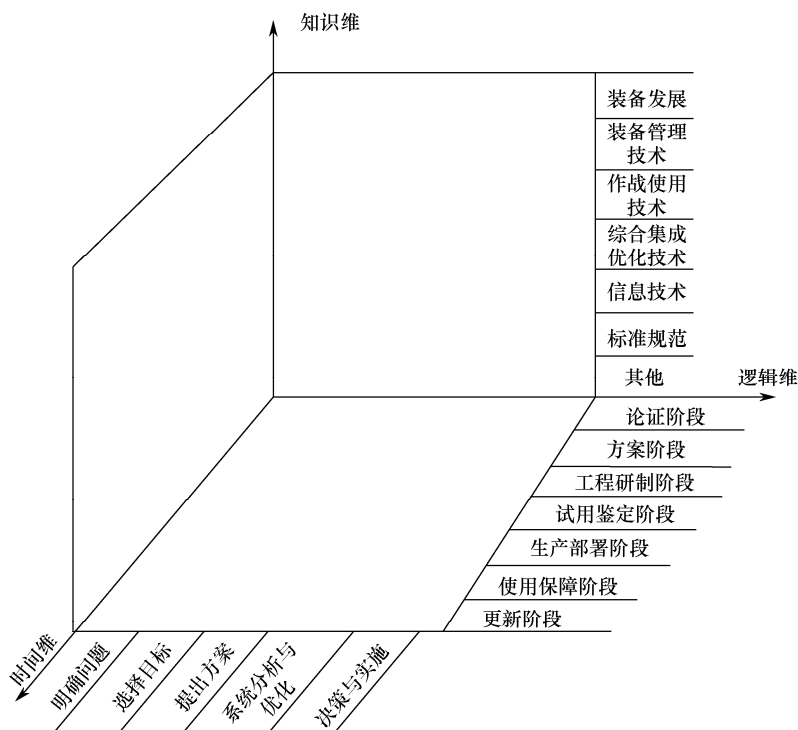


图 1-1 航空保障装备系统工程的霍尔三维结构

1) 时间维

时间维是航空保障装备从立项论证的提出到使用,再到新一轮更新优化的过程,一般分为以下几个阶段:

(1) 论证阶段。该阶段拟订航空保障装备体系发展规划,提出型谱发展建议,提出型号飞机的航空保障装备需求。

(2) 方案阶段。方案阶段也称为初步设计阶段,主要是对航空保障装备备选方案进行分析、评价和确认,以降低风险。

(3) 工程研制阶段。该阶段采取计划或竞争方式,进行详细的工程设计、样机研制,以实现航空保障装备研制方案。

(4) 试用鉴定阶段。该阶段组织研发单位和使用单位开展航空保障装备试用,并组织试验试用评估、问题整改和定型鉴定。

(5) 生产部署阶段。该阶段按照采购计划组织航空保障装备生产,经过验收后配备到各使用单位。

(6) 使用保障阶段。该阶段按照相关使用管理规定,组织航空保障装备交接、验收、入库、领用、归还、出库、故障与损伤修理等活动。

(7) 更新阶段。该阶段对航空保障装备技术状态、使用保障效果进行评估,根据航空保障装备发展和管理需求,及时退役报废和更新相关航空保障装备。

2) 逻辑维

逻辑维是航空保障装备系统工程过程应遵循的一般程序。

(1) 明确问题。明确问题即弄清问题的实质。通过到设计研制生产单位、管理与使用部门调研,全面收集有关资料和数据,了解航空保障装备配备、使用和管理现状,梳理使用单位需求,区分论证、设计、研制、使用和管理等原因,提出需要解决的问题。

(2) 选择目标。在弄清问题之后,根据问题的性质,确定航空保障装备系统工程问题的目标(经济性、可用性、机动性)或评价指标体系,以便据此对所有可供选择的系统方案进行比较和评价。

(3) 提出方案。按照问题的性质和目标要求,形成一些可能的系统方案以供选择,这一步骤也称为系统综合。

(4) 系统分析与优化。建立分析、评价模型,对各种可能的系统方案进行分析比较;在可行的系统方案中,根据目标准则,权衡确定最优的航空保障装备系统方案。

(5) 决策与实施。将航空保障装备系统方案选择及其情况说明向决策者汇报,决策者定下决心选择最合适的方案并予以实施。如果实施中比较顺利或者遇到的困难不大,可略加修改和完善将其确定下来,那么整个步骤告一段落;如果问题较多,这就要回到前面几个步骤中的任意一个,重新做起。

3) 知识维

知识维是指完成上述各阶段、各步骤的工作所需的各种知识和各种专业技术。航空保

障装备系统工程需要的知识包括装备（航空装备及保障装备）发展、装备管理与作战使用技术，系统集成优化技术、信息技术及标准规范等。

2. 并行工程思想

针对航空保障装备系统工程过程中全寿命周期阶段联系不紧密，职能部门缺乏共享、交流和沟通，缺少系统化、结构化分析方法和工具的问题，引入并行工程（Concurrent Engineering, CE）的思想和方法。并行工程是对产品及其相关过程，包括设计、制造、使用和维修保障过程，实行同步的综合设计的一种系统方法，已在武器装备领域发挥了重要作用。

1) 并行工程的定义

与传统的串行工程相比，并行工程是对项目及其相关过程进行并行、一体化工作的一种系统化管理模式，业已成为实施装备全寿命周期管理的理论基础。有关并行工程的定义很多，其中已被大多数人接受的是由维纳（Winner）在国防分析研究所 R-338 研究报告中给出的，即“并行工程是对产品及其相关过程（包括制造和保障过程）进行并行、一体化设计的一种系统化的工作模式，这种工作模式力图使开发者们从一开始就考虑到整个产品寿命周期（从概念形成到产品的报废处理）中的所有关键因素（包括质量、成本、进度和用户需求）”。从该定义可以看出，并行工程是一种管理模式，而不是具体的工作方法；并行工程要求在设计一开始就综合考虑装备寿命周期过程中的所有因素，旨在优化设计、制造和保障过程。

2) 并行工程的基本原理

传统的串行工程是一种“抛过墙”的模式，以邻为壑，论证、设计、研制、试验、使用和维修等多个过程序贯进行，各过程之间相互分离，各职能部门各顾一摊，以局部要求和部门利益为中心，工作缺乏相互的沟通和协调，使上游和下游、部门之间冲突不断，重新设计、返工、周期长、成本高等问题积重难返，难以快速响应使用要求。

作为一种新的管理模式，并行工程是对传统的串行工程的否定与创新，如图 1-2 所示。并行工程按照系统观点组成多功能产品开发小组（Integrated Product Team, IPT），以使用需求为牵引，注重统筹规划、早期决策，从更高的层次对武器装备寿命周期过程进行重组和并行思考。在武器装备开发的早期（上游阶段）就尽可能地考虑使用下游特性及其相关过程的各种因素，在设计过程中考虑并采取有效的措施解决制造过程中武器装备的生产性、装配性问题，以及保障过程中的维修、器材供应、人员训练等问题。通过武器装备寿命周期过程活动之间信息的共享与交换，在降低冲突水平的同时又显著改善了效率和效益。从中可以看出，并行工程与传统串行工程的根本区别在于并行工程把武器装备寿命周期过程活动看成是一个有机的整体和集成的过程，同时从全局优化的角度出发，对集成过程进行科学管理与有效控制，并利用各种先进的计算机辅助工具和信息化的产品数据管理技术手段对现有的产品开发过程进行不断地改造与提高。

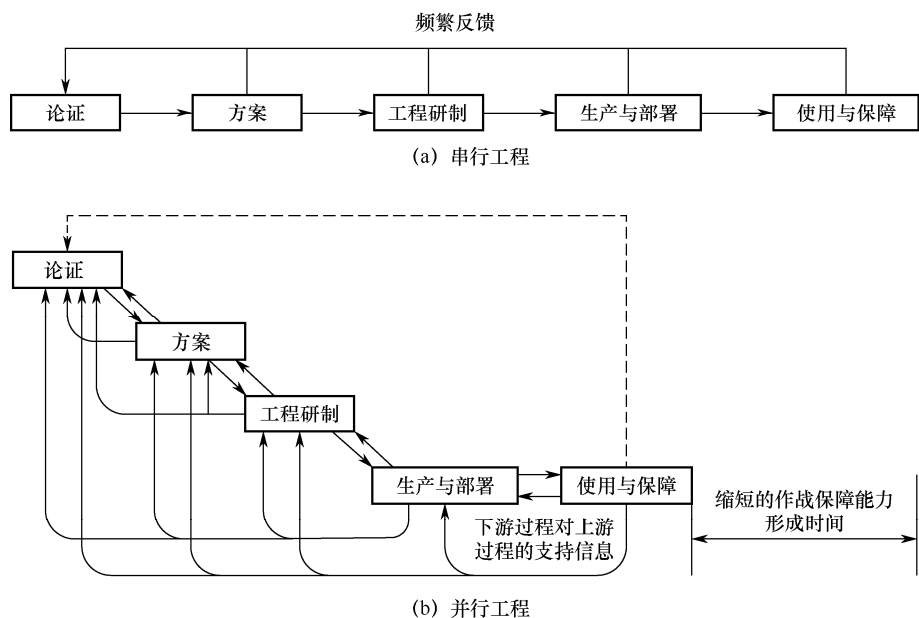


图 1-2 并行工程与串行工程的比较

3) 并行工程与航空保障装备系统工程

航空保障装备系统工程的基本目标是通过应用先进的思想理论、技术方法和工具手段，从系统整体的角度来解决航空保障装备系统中的矛盾和问题，使航空保障装备系统功能强、效率高、效益好、效能佳。并行工程作为一种先进的管理模式和管理思想，在技术和管理两个方面都提供了可供借鉴的东西，为航空保障装备系统工程活动创造良好的平台。并行工程对航空保障装备系统工程的影响和作用主要体现在以下几个方面：

(1) 并行工程以使用需求为牵引，始终从使用的角度出发，赋予了航空保障装备优良的作战使用适应性。

(2) 并行工程为推行航空保障装备全系统全寿命管理提供了理论和技术支持。并行工程以航空保障装备寿命周期过程的全局优化为目的，强调全寿命、全系统、全要素。

(3) 并行工程为航空保障装备系统工程活动提供了一种有效的组织管理模式——IPT。实行并行工程需要改变传统的部门化或由专业组开发人员组织，而采用跨部门的、多专业的 IPT。IPT 是指由所有与航空保障装备设计、制造、使用和保障等有关的职能部门和专业的代表人员组成的并行工程小组，能克服来自传统的职能管理习惯意识及狭隘的部门利益观，促进各职能部门专业领域人员的密切合作。

(4) 并行工程为航空保障装备系统工程构建了协同工作环境，特别是要构建面向 IPT，全寿命周期的数字化、网络化、虚拟化协同工作环境，实现产品信息的共享。

1.3 国内外相关研究现状

1.3.1 美军航空保障装备相关现状

1. 美军航空保障装备发展论证方面

在保障装备的发展政策方面，美国空军强调，在装备研制过程中，研制部门（型号办公室）要代表保障部门，确保将容易部署和防止新的保障装备扩散等顶层原则贯彻到型号中；必须在采办早期系统地考虑保障装备要求，因为它对装备的全寿命费用和是否容易部署有重大影响；装备设计时倡导减少保障装备要求、最大限度采用现有保障装备和工具，并尽可能不研制新的专用保障装备；型号办公室在提出保障装备的需求时，必须事先与保障装备的主管部门和装备使用部门进行协调；只有在现有保障装备不能满足使用要求的情况下，才能研制新的保障装备；新的保障装备必须标准化，如 F-22 飞机的液压车采用的是 B-2 和 C-17 运输机用的 A/M27T-13 液压车，电源车采用的是大多数轰炸机和运输机用的 A/M32A-86D 电源车。

在保障装备的论证方面，美国空军将航空装备及其保障系统（包括保障装备）作为一个全系统统一考虑、综合权衡，并同步设计、同步研制，以优化航空装备及其保障系统；特别是通过改进航空装备的可靠性、维修性和保障性设计，来减少对保障的要求，减少保障装备的品种和数量。F-22 飞机和联合攻击机（JSF）就是典型的例子。例如，F-22 飞机上采用机载氧气发生系统（OBOGS）、机载惰性气体发生系统（OBIGGS），并配备机载辅助动力装置（APU），同样 B-1B 战略轰炸机采用机载氧气发生系统，制氧和充氧都在飞机上完成，这样不仅减少了地面的保障装备，还减少了保障装备本身所需要的保障；F-22 飞机外场只需要一个便携式计算机就可以完成飞机在地面的故障检测。JSF 采用的预测与状态管理（PHM）技术能够对整个飞机的情况进行监控，在故障还没有出现时就可以进行预测和诊断，并将信息传给地面，这样就基本不需要地面的检测设备了。美国空军要求 F-22 飞机一个中队部署 30 天时需要的保障运输量为 7.8 架次的 C-141 运输机，比 F-15 飞机少一半。对于 JSF，美国海军陆战队要求 20 架飞机部署时需要的运输量不超过 8 架次的 C-17 运输机，空军要求 24 架飞机部署时需要的运输量不超过 8 架次的 C-17 运输机，美国海军要求不超过 46000m³ 和 243t，英国海军则要求不超过 21000m³ 和 102t，而现在同样规模的 F-16 飞机需要 18 架次 C-141 运输机。

另外，美军非常重视对标准的管理，会根据需求及时对标准进行修订更新，如《保障装备和联合综合后勤保障规范》（MIL-HDBK-2097A）、《航空专用保障装备设计通用规范》（MIL-S-8521D）已经进行了 3 次修订。完备的标准体系为美军航空保障装备需求分析、研制、生产、使用、维护和报废的全程标准化管理提供了有力支撑；为美国空军航空保障装备管理集中化，保障装备通用化、集成化，保障装备的论证、研制和生产程序规范化奠定了基础。

2. 美军航空保障装备管理方面

1) 空军机关管理

鉴于航空保障装备的重要性,美军十分重视航空保障装备的管理。美国空军总部成立了一个“空军保障装备工作组”,专门负责保障装备的发展战略和规划问题,其成员来自空军负责具体保障装备的部门。另外,美国空军还在罗宾斯空军后勤中心设立“保障装备与车辆管理处”,负责对所有保障装备从采购到维修保障的整个流程进行集中、统一管理,它负责管理 5 万多件保障装备、2 万多件备件,总价值 107 亿美元,每年预算近 5 亿美元。

2) 部队管理

美国空军部队的维修部门把保障装备的使用维修管理作为维修保障的单独职能。在保障装备的管理分工上,通常是所有带动力的保障装备都在一个设备维修中队的地面保障装备分队集中管理。在这个分队内通常有两个小队或组,一个小队或组负责检查和维修,保证所有地面保障装备经常处于良好状态,另一个小队或组则负责发放与回收。当其他单位需要使用这些地面保障装备时,须按计划提出申请,由地面保障装备分队按时送到使用地点并在用完后收回。不带动力的地面保障装备通常由各单位自己负责维修和保管。

3. 美军航空保障装备作战使用方面

美国空军采用“空中远征队”的作战形式,并提出要具备“敏捷作战保障”和“全球快速机动”的能力。这对航空保障装备的作战使用模式提出了新的要求。

对于简易基地的快速部属,美空军主要使用基本型远征机场保障装备系统,该系统由 6 个模块构成。

(1) 150 人规模的野营装备模块。该模块最多能保障 150 人约 5 天的生活所需。装备器材包括气候恶劣地区使用的帐篷空调设备、基本卫生设备、低压发电和输电设备、叉车等。整个模块重 44t,需要 1 架次 C-17 运输机空运。

(2) 初始 550 人规模的野营装备模块。该模块提供宿舍、空调设备、卫勤和饮食保障。装备器材包括帐篷、厨房、冰箱、基本卫生设备、洗浴单元、厕所、高低压发电设备、供水设备、维修设备、祷告室、太平间及仓库等。该模块重 229t,需要 6 架次 C-17 运输机空运。

(3) 后续 550 人规模的野营装备模块。该模块用于增强“初始 550 人规模的野营装备模块”的保障能力,可与之同时展开或随后部署。该模块提供宿舍、厕所、空调设备、高低压发电和输电设备、供水设备、营区照明设备等。该模块重 188t,需要 5 架次 C-17 运输机空运。

(4) 设施构筑模块。利用该模块可以构筑小型、中型、大型掩蔽所或基础设施,用于土木工程、物资储备、车辆装备检修及打包装箱等。该模块能够保障 3300 人,重 267t;需要 7 架次 C-17 运输机空运。

(5) 初始飞行保障模块。该模块负责第一个飞行中队的飞行保障任务。设施设备包括航空电子设备修理室、燃料实验室、消防设备、飞机失事抢救装备、飞机掩蔽库及通用掩

蔽所,以及机场应急助航灯光系统和移动式飞机拦阻系统。该模块重 248t,需要 7 架次 C-17 运输机空运。

(6) 后续飞行保障模块。该模块与“初始飞行保障模块”的功能相同,负责增援保障,每增加一个飞行中队,增添一个该模块。该模块重 39t,需要 2 架次 C-17 运输机空运。

另外,目前美空军正在按照 4 架战斗机和 1 架运输机的“4+1”模式来运作“前沿弹药+油料补给点”(FARP)概念。每架 C-130 运输机、C-17 运输机、C-5 运输机中安装储油罐和加油套件,以及需要补充的武器、保障装备和器材等。同时,美空军还正在开发一种战斗机自身携带的“动力-吊舱”,将地面电源车、空调车、空气压缩机等地面动力设备小型化、组合化,综合到一个吊舱,需要时,由战斗机自己携带到作战地区,实现自我保障。

通过上述分析可以看出,美军在航空保障装备发展论证方面,保障装备定量、定性指标要求的提出、考核和评估更加刚性;在航空保障装备管理方面,注重集中管理和资源共享,以发挥保障效益;在航空保障装备作战使用方面,则全面贯彻敏捷保障、全球保障思想。

1.3.2 民航航空保障装备相关现状

1. 民航航空保障装备的管理

《民用航空器维修单位合格审定规则》(CCAR—145R3)要求维修单位应根据维修许可证限定的维修范围和有关适航性资料确定其维修工作所必需的工具设备,并按下列规定对其进行有效的保管和控制,保证其处于良好可用状态。

(1) 维修单位应具备足够的工具设备,以保证其工具设备失效后能够在短期内恢复相关维修工作。

(2) 维修单位可以使用与有关适航性资料要求或者推荐的工具设备具有同样功能的替代工具设备,但使用前应向民航总局或者民航地区管理局证实其等效性并获得批准或者认可。

(3) 维修单位可以租用或者借用某些使用频率较低或者投资较大的特殊设备,但应向民航总局或者民航地区管理局提供有效的合同或者协议,并证明维修单位有能力控制其可用性。

(4) 维修单位应制作专用工具设备标识及清单,并建立保管制度,避免工具设备的非正常失效和遗失,保证维修工作需要的工具设备处于可用状态。

(5) 维修单位应建立检测工具或者测试设备的校验制度。

《维修和改装一般规则》(CCAR-43)要求任何人在对航空器或者航空器部件进行维修或改装工作时,都应使用保证维修和改装工作能按照可接受的工业准则完成所必需的工具和设备(包括测试设备);如果涉及制造厂推荐的专用设备,工作中应使用这些设备。当使用制造厂推荐专用设备的替代设备时,应获得民航总局的批准。《维修单位的自制工具设备》(AC-145-10)明确了自制工具设备的基本原则。

2. 民航航空保障装备的分类与配置

《民航设备分类与代码》(MH/T 5001—1993)中明确了飞机维修设备、飞机试验设备、机务特种车辆的分类。其中,飞机维修设备是指对飞机(机体、发动机和机载设备及附件)进行维护和修理工作中所用的专业设备,包括工作梯、吊架、千斤顶、升降台、拖把、维修托架、部附件拆装设备、地面静态电源;飞机试验设备是指对飞机、发动机、机载设备和附件在地面进行试验、测试检查所使用的专用设备,包括飞机发动机试验台、特设试验台、附件试验台、发动机试验检测仪器、特设试验检测仪器、飞机试验检测仪器等;机务特种车辆包括飞机牵引车、航空交流电源车、航空直流电源车、气源车、空调车、制氧车、充氧车、飞机除冰车、高空作业车、液压车、冷气车。《民用机场特种车辆、专用设备配备》(MH/T 5002—1996)明确了不同等级的机场,具备规定功能所应配备机场设备品类和特定数量的最低限额。

通过上述分析可以看出,民航航空保障装备的发展、使用、管理都是根据适航法规要求去落实的,以满足质量安全的目标;而航空保障装备设计、研制、采购方面则充分利用市场因素,以调动航空生产或修理企业主动推动保障装备的小型化、通用化、标准化工作。

1.3.3 相关关键技术研究现状

1. 保障装备体系需求分析方面

原第二炮兵装备研究院的田留宗研究了保障装备体系的论证方法和技术途径,分析了信息化条件下联合作战对保障装备体系的要求,提出了开展导弹武器保障装备体系综合论证的基本内容和适用方法,建立了基于装备集成及任务符合度的导弹武器保障装备体系保障能力多指标综合评估方法,并对保障装备体系结构优化、装备研制、配套建设等提供了技术支持。原军事交通学院的马洪文为加强联合保障能力、解决各军兵种装备需求论证缺乏统一决策依据的问题,将公理设计理论与创新问题解决理论相结合,在一定程度上实现了保障装备体系需求设计的合理性。原解放军电子工程学院的李运祯针对当前技术保障装备体系建设存在的不足,分析了技术保障装备的能力需求,并围绕体系建设思想观念、整体规划和手段等方面进行深入思考。原装备指挥技术学院的穆歌针对保障装备体系需求论证缺乏一体化分析方法的问题,提出了基于“ABM+”视图生成的保障装备体系构成需求分析方法。

2. 保障装备型谱优化方面

型谱优化是从产品型谱管理概念延伸而来的。在较早开始研究型谱优化的航天领域,大多采用基于成熟度评估和优选的型谱优化方法,但该方法缺乏定量的优化模型和算法。在民用产品领域,高飞等基于优先系数提出了产品族型谱的交互系列和自动系列规划模型,其中交互系列规划适用于新产品设计,自动系列规划适用于适应性设计,通用性不高。在军用保障装备领域,孙栋等针对大型动员装备加装器材系列型谱的优化问题,在型谱编制过程中主要采用选取加装器材的关键特征参数对照军标进行评价的方法,来确定加改

装器材系列型谱优化方案；孟祥辉等针对舰船武器保障设备型谱优化问题，在分析舰船武器维修保障任务与保障设备之间对应关系的基础上，建立了基于 0-1 整数规划的舰船武器保障设备配套优化模型。

3. 保障装备数量配置方面

国外对于保障装备需求配置的研究，主要集中在运用排队论方法确定保障装备数量。如 Dyer 等人证明了在 M/M/c 服务系统中顾客等待时间是服务台数量的单调递减凸函数，由此认为应用边际效应分析方法优化保障装备数量是可行的。Alfredsson 和 Diaz 等人综合考虑保障装备需求确定与备件库存优化的问题，利用排队论方法建立了故障产品的维修等待模型，将故障产品的维修和保障装备数量需求关联起来，分别给出了以费用和故障产品等待时间为约束的备件和保障装备数量确定模型。

国内对于保障装备的数量配置问题，主要是根据 GJB 5967—2007《保障设备规划与研制要求》中推荐的类比法和估算法进行分析和确定的。同时，部分学者对排队论方法的实际运用也进行了深入研究，如单志伟、郭红芬等将保障装备的使用过程看成一个随机服务系统，根据实际保障任务要求，运用排队论方法确定保障装（设）备的数量。还有部分学者针对装备研制阶段的保障装备数量配置问题进行了系统的分析和研究，如北航的郭霖瀚提出了在装备研制阶段通过分析保障活动进行装备保障资源数量预测的方法；刘瑞提出了在研制阶段利用保障活动规划网络图进行保障设备数量预测的方法。另外，还有部分学者针对飞行保障过程中的四站保障装备数量配置问题进行了深入研究，如罗先敏等运用离散事件系统数学建模技术中的随机服务系统理论，建立了多机种四站保障装备需求模型；赵经成等运用非线性规划理论，基于保障任务时间约束，构建了多机种机务准备过程中的四站保障装备配备优化模型。

4. 保障装备效能评估方面

北京航空航天大学的张侦英等人针对工程实际中普遍存在的使用保障活动与维修保障活动并发这种典型的复杂情况，以基本作战单元为研究对象，基于排队论方法建立了保障设备满足率预计模型。北京航空工程技术研究中心的孙蛟等人针对军用飞机保障设备利用率难以有效计算的问题，在分析保障设备使用特性的基础上，通过引入资源工时的概念，提出了保障设备利用率的新定义和数学模型，建立了基于仿真方法的利用率计算模型和简化的工程计算模型。武汉理工大学的左德华采用层次分析法和专家调查法相结合的方法来对船艇保障装备设备体系的保障效能进行评估，但存在指标权重受专家主观因素影响大、未考虑指标的投入产出特性等不足。在保障装备效能评估研究方面，主要存在以下几个方面的问题：①指标体系不完善的问题，如缺少费用指标、任务完成、装备完好等方面的指标；②集中在单项评估方面，缺乏综合评估的方法及保障效益方面的分析。

1.4 主要研究内容

全书按照“概念内涵—过程模式—关键技术—总结展望”的逻辑层次进行组织，共 8 章。本书逻辑结构如图 1-3 所示。

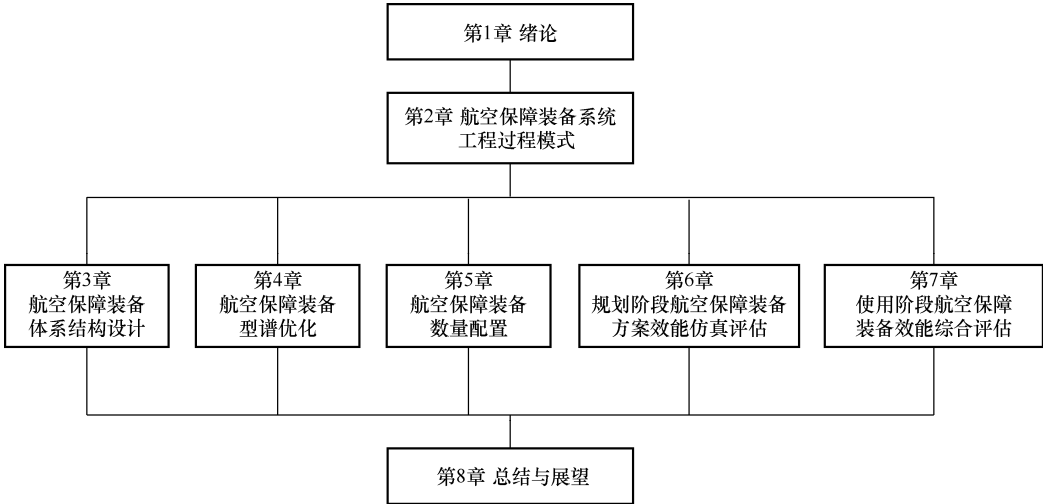


图 1-3 本书逻辑结构

各章的具体内容如下。

第 1 章绪论，介绍了航空保障装备的概念与分类，航空保障装备系统工程的产生背景、概念、主要观点与遵循的基本方法论，并阐述了相关领域的研究现状。

第 2 章航空保障装备系统工程过程模式，结合航空保障装备特点，分析研究了航空保障装备型谱化发展论证、研制、使用管理、作战运用等过程模式。

第 3 章航空保障装备体系结构设计，运用能力需求论证理论和 DoDAF 2.0 视图分析方法，研究了基于视图分析方法的航空保障装备体系结构设计方法。

第 4 章航空保障装备型谱优化，构建了航空保障装备型谱重要度评估指标体系，提出基于重要度评估和多种群遗传算法的航空保障装备型谱优化方法。

第 5 章航空保障装备数量配置，建立了航空保障装备数量配置的一般流程，研究了航空保障装备数量配置方法的基本原理、应用过程、适用范围与应用案例，提出了航空保障装备数量配置方法运用的逻辑决策过程。

第 6 章规划阶段航空保障装备方案效能评估，研究了基于仿真的规划阶段航空保障装备方案效能评估流程框架，系统研究了基于离散事件仿真原理的仿真评估模型和算法策略。

第 7 章使用阶段航空保障装备效能综合评估，研究了使用阶段航空保障装备效能综合评估流程和评估指标体系，提出了基于 DEA 的使用阶段航空保障装备效能综合评估方法。

第 8 章总结与展望，对全书进行总结，归纳出创新点，对下一步工作进行展望。

航空保障装备系统工程过程模式

航空保障装备系统工程贯穿于寿命周期的全过程，涉及航空保障装备论证、研制、采购、使用、维修等方面，以确保最终用户在使用阶段能以经济的寿命周期费用获取高适应性的航空保障装备。本章针对航空保障装备的特点，结合军民融合、精细化管理、装备采办、实战化训练保障等领域的最新发展趋势，重点研究航空保障装备型谱化发展论证模式、联合与竞争研制模式、精细化使用管理模式及作战运用模式。

2.1 航空保障装备型谱化发展论证模式

目前航空保障装备主要是基于型号的发展论证模式，强调与主装备同步论证、同步配套，缺乏整个航空保障装备体系自身的论证和规划，使航空保障装备种类繁杂、功能重复，技术体制不统一，“标准化、通用化、系列化、模块化、信息化”水平低，导致保障规模大、保障尾巴长等问题的发生。因此，为提升航空保障装备体系能力，构建序列配套、精干敏捷的新型航空保障装备体系，有必要从源头上创新航空保障装备论证模式。本章借鉴基于能力的需求论证理论方法和相关领域型谱化发展研究实践的有益经验，研究探讨航空保障装备型谱化发展论证模式。

2.1.1 航空保障装备型谱化发展基本内涵和策略

1. 航空保障装备型谱化发展基本内涵

产品型谱是指以最少数目的不同规格产品为标志，满足较长时期和一定范围内全部使用要求的产品系列。本章结合航空保障装备的特点，给出航空保障装备型谱、航空保障装备型谱化发展概念内涵的界定。

(1) 航空保障装备型谱。航空保障装备型谱是指能满足较长时期和一定范围内全部使用要求的最少保障装备序列，是该类装备序列化、标准化的顶层规划，明确了航空保障装备发展与应用的方向。航空保障装备型谱具有满足当前使用及未来发展需求、以不同规格保障装备序列为标志、由最少数目的规范化保障装备组成等特点。

(2) 航空保障装备型谱化发展。航空保障装备型谱化发展就是通过需求整合，合并、优化航空保障装备规格，统一航空保障装备状态，以较少规格数量的航空保障装备满足所有应用需求，进而提升航空保障装备通用化、综合化、小型化、序列化水平。

2. 航空保障装备型谱化发展基本策略

航空保障装备型谱化发展主要有两种思路：一是对不同型号飞机具有相同或类似保障功能的保障装备进行综合集成和优化，形成某特定类型保障装备的型谱，如图 2-1 所示；二是对同型飞机不同保障功能的保障装备进行综合集成和优化，形成优化后的某型飞机保障装备型谱，如图 2-2 所示。在具体工作实践中，航空保障装备型谱化发展应该走上述两种发展思路并举的策略。

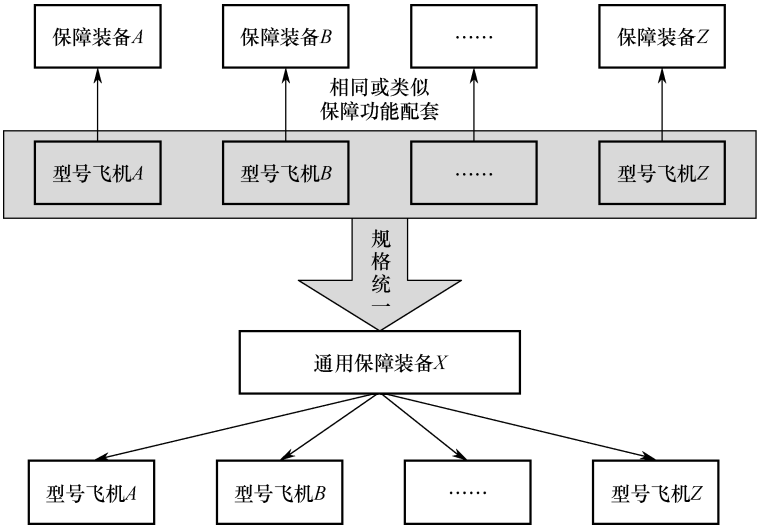


图 2-1 航空保障装备型谱化发展策略 (1)

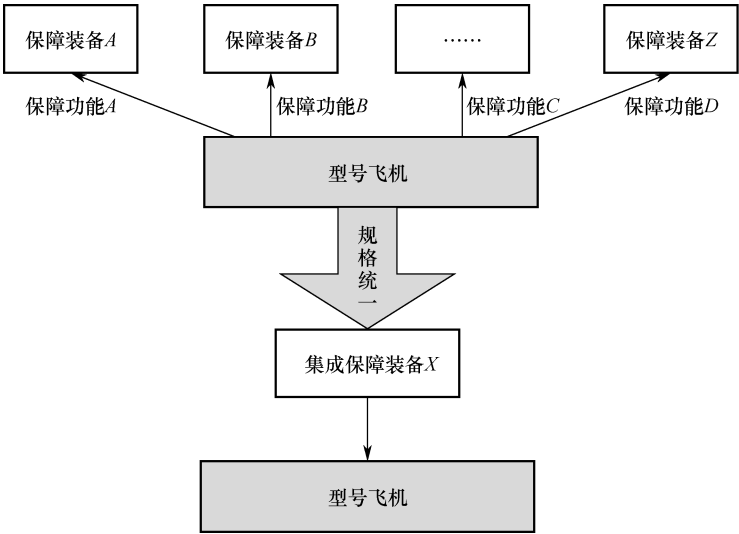


图 2-2 航空保障装备型谱化发展策略 (2)

2.1.2 航空保障装备型谱化发展论证模式

航空保障装备型谱化发展论证模式是指论证主体在全面掌握航空装备、作战样式、体制编制、保障使命任务、保障模式及现有保障装备体系构成和能力现状的基础上，为牵引航空保障装备的型谱化发展，在一定的论证原则下，利用科学的论证方法和工具，生成与航空装备发展相适应的航空保障装备型谱。航空保障装备型谱化发展论证的输入、输出关系概念视图如图 2-3 所示。

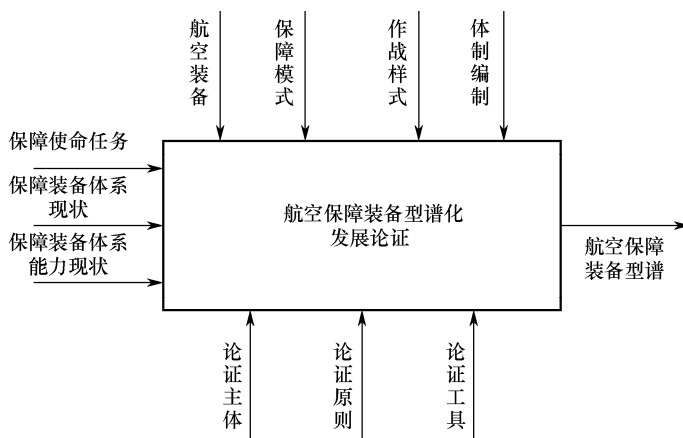


图 2-3 航空保障装备型谱化发展论证的输入、输出关系概念视图

1. 型谱化发展论证基本原则

航空保障装备型谱化发展论证应尽量遵循以下原则：

(1) 需求牵引原则。航空保障装备型谱化发展论证首要考虑的就是能力需求、任务需求、未来主战装备及其保障装备的发展需求，根据上述需求生成能够满足未来作战运用与保障需求的航空保障装备型谱。航空保障装备作为航空兵作战单元战斗力生成的物质基础，更应该围绕作战能力需求搞建设、谋发展，在建设上要突出重点和新型航空装备，重点发展快速充填加挂、机动保障、原位检测、深度检测、战场抢修等保障装备。

(2) 型号配套原则。航空保障装备与主装备是一个相互关联、相互影响、相辅相成的有机整体。没有配套的航空保障装备，主装备就难以发挥应有的作战效能。做好航空保障装备型谱化发展的同时，还应该坚持型号同步配套，特别是型号的专用航空保障装备论证结果应与航空保障装备型谱化论证结果进行综合权衡，形成科学合理的替换、更新和优化机制。

(3) 综合集成原则。型谱是优化、简约的产品序列。航空保障装备型谱化发展论证应该综合现有保障装备体系、新型号配套的航空保障装备及未来需要发展的航空保障装备，以保障效能提升为目标，进行综合集成优化，开展通用化、小型化和信息化改造，以提高多机种保障、机动保障和快速保障能力。

(4) 验证评估原则。航空保障装备型谱化发展论证结果应在体系规划、型号论证研制、试验鉴定、使用保障等阶段开展验证评估，并根据效能分析结果进行调整和优化。同时，还应明确需要进行的验证评估内容、方法和标准。

2. 论证主要流程

航空保障装备型谱化发展论证应借鉴基于能力的需求论证方法，构建航空保障装备型谱化发展论证一体化框架，支撑航空保障装备型谱（体系）的生成。该论证模式的基本流程是：首先，在作战保障样式想定的基础上，确定作战单元的保障任务需求，并分解为各保障节点（力量单元）的子任务/活动需求；基于矩阵映射方法，将保障任务/活动映射为航空保障装备体系的能力需求；分析评估现有航空保障装备型谱能力是否满足需求，根据能力隙缝导出对航空保障装备的需求；其次，综合现有航空保障装备型谱构成，生成初步的航空保障装备型谱结构；基于综合集成技术，对初步生成的航空保障装备型谱结构进行优化；最后，在对航空保障装备数量需求分析的基础上，进行体系效能评估，判断型谱论证结果是否满足需求。基于型号配套的航空保障装备论证和选型应该根据基于型谱化发展的航空保障装备论证结果，进行优选或集成。航空保障装备型谱化发展论证流程如图 2-4 所示。

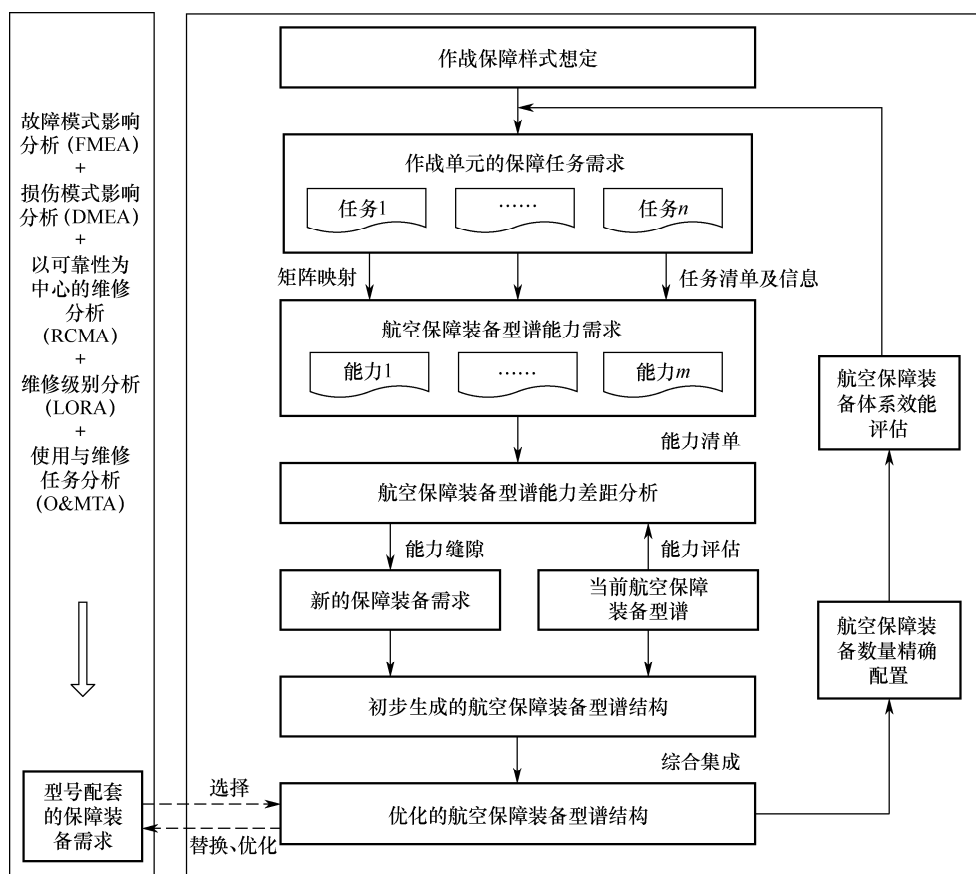


图 2-4 航空保障装备型谱化发展论证流程

2.1.3 航空保障装备型谱化发展论证管理

航空保障装备型谱化发展的有效管理是型谱发展论证、建设的基础和保障。

(1) 建立组织机构、明确职责。推进航空保障装备型谱化发展的首要条件是健全组织机构,做到分工清晰、职责明确,依靠团队力量将各项工作策划和设想逐步推进。应该成立一个以军方为主,由各职能部门(科研院所、部队、国防工业部门)代表组成的航空保障装备管理委员会、管理办公室和专家组,统筹考虑和协调所有航空保障装备顶层规划、系统发展和“三化”问题。明确委员会作为型谱管理的最终审查机构,办公室负责型谱建设策划、组织、实施工作,专家组负责型谱的分类审查和制定;相应组织人员采用动态管理,各组人员如发生变化,由其职位接替者担任,避免因人员变动导致文件失效。航空保障装备管理委员会应尽量设在综合计划部门,发挥组织、决策作用,装备论证研究单位应发挥主要支撑作用。通用航空保障装备型谱论证应尽量邀请科研订货部门人员参与;专用航空保障装备型谱论证应尽量邀请外场使用部门人员参与。

(2) 型谱动态调整和优化机制。在初步建立、健全航空保障装备型谱的基础上,应完善型谱的动态管理机制,形成航空保障装备型谱动态管理工作流程及产品成熟度变更工作要求。特别是要在新机型配套、维修规划制订、年度配备标准修订等重要时机开展型谱动态调整工作;型谱动态调整和优化工作需要法规制度作保证,确保严谨、科学、有法可依。例如,保障装备型谱更新,需填写型谱更新申请表;受理型谱更新申请时,须出具型谱更新审批表等。

2.2 航空保障装备研制模式

在当前军民融合发展的大背景下,应在航空保障装备研制主体飞机主辅院所、军队院所、部队作战单元及民营企业之间形成充分、公平的融合与竞争机制,推进航空保障装备与航空装备同步研制,以同步形成作战保障能力。

2.2.1 典型航空保障装备研制模式

我国航空装备引进和自研并存,在航空保障装备研制上存在引进模式、飞机主辅院所模式、军队院所模式和作战单元自主模式四种。

1. 引进模式

引进模式主要是伴随飞机的引进而产生的。其主要特点是:受外方技术限制、引进装备适应性改装等因素影响,保障装备配套引进不全面,往往只能根据实际引进一些重点、关键的保障装备,其余部分还要依靠国内研发配套,体系保障能力形成有一定延迟,影响

飞机战斗力的快速形成；受采购价格的波动性变化和国外生产厂的不定期变更，保障装备备件采购和储存很难充足和及时保障，难以及时足量补充所需保障装备；保障资源缺乏，保障装备的保障资源是按研发国的资源情况设计的，国内无法全部满足这些资源配置。例如，在引进时，未能引进保障装备的教学资源、技术资料等资源；即便引进了相应的保障资源，受保障资源消化周期的影响，也不能及时提供，如引进的技术资料难以及时准确翻译整理等。

2. 飞机主辅厂所模式

飞机主辅厂所模式是由参与飞机研制的有关飞机主辅工厂、研究所研制飞机保障装备的一种模式，它是国产飞机保障装备研制的主要模式，在飞机保障装备研制中发挥主体作用。其主要特点是：能结合研制过程，初步配套研制相应的保障装备；享有飞机的全面技术、资料等资源信息，尤其是相关的自主知识产权装备设备资源，便于保障装备的集成优化；拥有较为完备、先进的生产工艺和设备及标定、检验设施设备，取得了相关的生产资质、资格证书，保障装备的质量有保证；配有相对稳定的研发链，便于批量生产保障装备。但是飞机主辅厂所受研制经费、周期、利益的制约，往往对保障装备的重视和投入程度不够；对作战单元具体使用情况和需求把握不准，保障装备配备不够完整，保障装备研制不能全面满足作战单元转场、多机种、应急机动保障等任务需求；对装备修理级别考虑不充分，缺乏从一线、二线到三线保障装备的系列、规范、标准地统筹考虑。

3. 军队院所模式

保障装备研制军队院所模式是在保障装备改进革新中发展起来的一种新型模式。其主要特点是：军队院所装备教学研究资源较丰富，具有装备保障的全系统和全专业装备资源；人才资源比较丰富，具有完备的学科专业队伍，尤其是较强的高层次学科队伍或高学历教员队伍；纵横联系较为广泛，对作战单元的一线需求比较清楚，对新装备的研制跟踪比较紧密，对装备保障理论研究比较深刻。军队院所模式的主要劣势是：对装备的接口数据需求依赖性较强，没有飞机主辅厂所的支持和配合研发难度较大；生产设施条件不完善，家庭作坊式生产、委托加工、采购后改头换面现象突出，不具备工业批量生产的能力；缺乏生产的各种资质资格，严格执行国家、军队相关法规标准的意识和能力较弱。

4. 作战单元自主模式

按照配备标准配发作战单元的保障装备，有统一的型别、规格和统一规定的检测性能与精度，属于标准保障装备。作战单元在航空装备使用和维护过程中，根据实际需求，自行研制一些应急、好用的非标准保障装备。作战单元对保障装备的使用具有发言权，它一直是保障装备革新的主力军，尤其在非标准保障装备研发中具有特殊地位，逐渐加入到了保障装备研发的方阵。这种模式的主要特点是：提出的问题针对性、应用性极强，极易得到上级机关和飞机主辅厂所的重视；保障装备的历史资料比较齐全，对装备的性能特点、故障规律掌握得比较透彻。其主要劣势是：工作任务相对繁重，人力资源尤其是高层次、高

水平人才较为缺乏；自主研发经费保障不足；先进理论掌握应用力度不够，研发水平不高。

2.2.2 航空保障装备联合研制模式

飞机主辅厂所、军队院所、作战单元及民营企业等单位在航空保障装备需求分析、设计、制造、先进技术储备等方面各有优劣势。航空保障装备联合研制模式就是要以提高航空保障装备系统效能为目标，在上级科研订货和使用业务机关指导下，发挥各研制主体的优势，通过有效的分工、协作机制，快速实现航空保障装备的联合研制。

军队院所、作战单元（包括相应的修理厂）应充分发挥熟悉需求、便于组织验证评估的优势，深入分析航空装备的作战任务，充分借鉴现有相关保障装备的使用经验，紧密结合航空装备保障实际和现实保障资源，提出原有保障装备的改进建议，新型保障装备的需求、技战术指标和考核验收方案。军队院所、作战单元研制工作的参与可以通过需求分析和试验鉴定、验证评估类研究课题的方式予以推动。

飞机主辅厂所，应充分发挥数据、接口、设备、生产等优势，重点承担设计和生产职能，在设计中尽量实现保障装备研发需求。在航空装备的研制过程中，不断结合出现的新情况、新特点和新需求，修改保障装备需求、修理体制、修理级别、资源配置、教学资源，使保障装备和航空装备同步配套，实现战斗力和保障力的提高。

民营企业，特别是高新技术企业，应充分发挥技术跟随快、市场嗅觉灵敏等优势，注重通用化、小型化、多功能化保障装备的研制，特别是货架采购标准产品的研发，打破传统航空工业部门和作战单元研发的封闭循环。

2.2.3 航空保障装备竞争研制模式

为避免航空保障装备研制生产的垄断，实现合理、有效的竞争，上级科研订货部门应联合使用部门，按照批准的需求目录清单，吸收军内外单位参加，采取竞争方式确定分工定点，组织开展研制，并组织相关作战单元开展保障装备的试验和试用。

航空保障装备竞争研制模式应把握以下原则。

（1）坚持军方主导。在航空保障装备研制全过程中，应真正确立军方（用户）的主导地位，使军方始终掌握主动权。为发挥主导作用，军方应制订航空保障装备型谱发展建议，作为各研制单位后续竞争研制采购的依据。另外，军方在组织项目的定标、投标、评标，选择承制单位方面；拟订工作计划，制订项目进度，参加项目各阶段评审方面；监督合同和经费执行情况，组织项目的试验鉴定，对合同完成情况进行综合验收等方面，应该积极参与，发挥应有的主导作用。

（2）完善科研招投标制度。制定航空保障装备研制招投标管理办法，营造公平竞争环境。在飞机详细设计阶段，组织总师单位提出保障装备需求分析报告和需求目录清单。按照批准的需求目录清单，通过招投标等竞争性方式择优选择研制单位。有条件开展竞争的

航空保障装备研制项目，要通过竞争确定承研单位；没有条件竞争的项目，也要在分系统的层次上开展竞争。承制单位应具备相关承制资质。

(3) 改革现行合同管理办法。现行指令性计划下的合同制存在的问题是：第一，法律约束力差，无奖惩措施和法律依据；第二，合同形式简单，内容不完整，不利于竞争；第三，合同管理以行政管理为主要手段，而不是以法律为依据。在引入竞争机制时，必须对现行合同管理办法进行改革，变指令性计划下的以行政制约手段为主的合同制为指令性计划下以法规制约和市场调控为主的合同制。

(4) 完善激励、惩罚制度。承制单位参与航空保障装备研制的竞争，要花费大量的人力、物力和财力，尤其是采用实物性竞标，要求研制或试制样机，投入更大。没有相应的激励补偿保护政策，对未中标单位进行必要的补偿，势必影响参与竞争的积极性和保障装备研发能力的保持与提高。为此，可以通过建立奖罚机制，保证责、权、利统一；对质量问题频发、虚报价格、服务保障差的承制单位，根据问题性质，给予处罚。

2.3 航空保障装备使用管理模式

各级航空保障装备业务管理部门需要在使用阶段对航空保障装备计划、实力、日常工作、定期工作进行管理，以提高航空保障装备综合管理效益。

2.3.1 航空保障装备使用管理活动

(1) 计划管理。计划管理重点是对航空保障装备修理、检定、报废退役、补充更新、调配、预置等计划进行管理，主要包括计划拟制、计划审批、计划执行、计划监控等管理活动。其中，修理计划主要用于预先安排航空保障装备修理日期、修理等级和承修单位的活动；检定计划主要用于预先安排航空保障装备检定日期、检定单位与经费需求的活动；调配计划主要用于预先安排航空保障装备调入、调出的活动；退役报废计划主要用于预先安排航空保障装备退役报废需求的活动；补充更新计划主要用于预先安排航空保障装备补充更新需求的活动。

(2) 实力管理。实力管理重点是对航空保障装备配备标准、技术状态、实力逐号统计作战单位实力统计等信息进行管理。其中，配备标准管理主要用于确定航空保障装备配备的比例、机种、机型等特征；技术状态管理主要用于对航空保障装备当前和历史技术状态的管理，包括对基本属性、使用、修理、保养信息的管理；实力逐号统计主要用于对唯一编码的航空保障装备库存、借用、在修、在检等信息的统计；作战单位实力统计主要用于对作战单元保障装备库存情况、实力及状态、缺配情况、效能指标的统计，效能指标通常包括完好率、送修率、受检率、利用率等。

(3) 日常工作管理。日常工作管理重点是对航空保障装备的交接、验收、出入库、领

用归还、故障与修理等活动的管理。其中，交接管理主要是对航空保障装备交接活动，以及发付方、交接方、交接时间和交接人信息的管理；验收管理主要用于对接收航空保障装备的验收和验收记录的管理；出入库管理主要用于对接收的航空保障装备（包括自购新品、上级配发新品、待修品、修复品）的出入库进行管理；领用归还管理主要用于对航空保障装备领用归还活动的管理；故障与修理管理主要用于对航空保障装备故障信息、修理活动的管理。

（4）定期工作管理。定期工作管理重点是对航空保障装备的检定计量、定期保养等工作的管理。其中，检定计量主要是对航空保障装备的检定实施过程活动，以及检定方式、检定周期、检定类型、历史检定等信息的管理；定期保养主要用于对航空保障装备的定期保养过程活动，以及保养方式、保养周期、保养类型、历史保养等信息的管理。

作战单元航空保障装备使用管理总体流程如图 2-5 所示。其中，航空保障装备领用归还管理流程如图 2-6 所示。

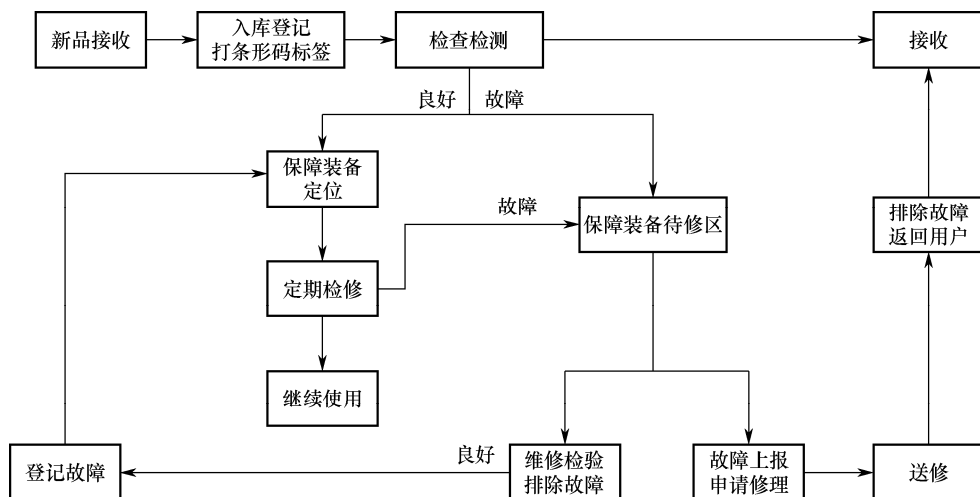


图 2-5 作战单元航空保障装备使用管理总体流程

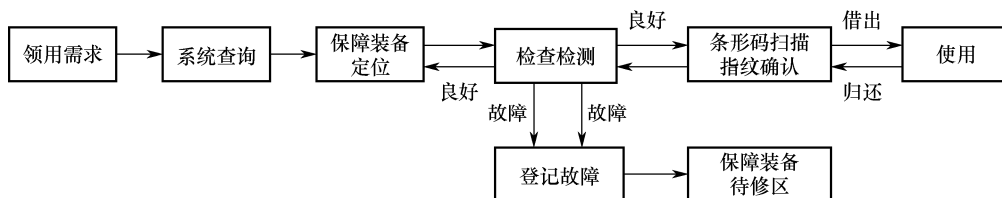


图 2-6 航空保障装备领用归还管理流程

2.3.2 航空保障装备精细化使用管理模式

1. 航空保障装备精细化使用管理思路

航空保障装备精细化使用管理的目标是实现航空保障装备状态、质量、过程的可控。一是实行集中统管，实现航空保障装备全方位实时可控。对航空保障装备进行定位管理，登记造册、建立档案，全面掌握航空保障装备种类、数量、型号规格和状况。二是健全管

理机制，实现航空保障装备质量可靠、随时可用。建立健全专人保管、安全管理、维护保养等制度，强化日常维护，及时检修送修，提高航空保障装备使用效能。三是运用先进手段，实现航空保障装备全过程精细管控。建立航空保障装备管理流程，运用维修保障支持系统和编码技术，实现航空保障装备接收发运、领用归还、使用维护、检定修理、报废更新等环节的全过程管理。

2. 航空保障装备精细化管理策略

(1) 明确职能定位和岗位分工。明确航空保障装备管理的主体、主要职能；明确各管理主体负责人、保管员、检验员等相关岗位的分工和职责。

(2) 集中管理。航空保障装备采取“逐件编码、统一管理、分类存放、集中检定”的管理方式。

(3) 打包管理。打包管理是指根据维修保障任务、特定维修项目，确定所需航空保障装备，进行捆绑打包、单独放置、整套使用的管理方式。打包管理可以便于领用、携行、使用和保管，提高航空保障装备使用安全和工作效率。

(4) 航空保障装备资料管理。航空保障装备资料包括技术档案、过程管理资料和航空保障装备技术手册等。航空保障装备资料应集中存放、分类建档、立卷存放、专人负责、方便使用、符合保密要求。

(5) 航空保障装备保管。航空保障装备应统一管理、分类存放、固定场所、专人保管，做到分工明确、责任落实。

(6) 流程化管理。航空保障装备交接、入库、领用归还、维护保养、检定修理、报废处理等管理环节必须有规范的流程标准。

2.4 航空保障装备作战运用模式

2.4.1 航空保障装备作战运用内涵

1. 航空保障装备作战运用概念

根据航空保障装备的特点和装备作战运用的概念，将航空保障装备作战运用的概念归纳为：根据航空兵作战任务和战场态势，在作战准备、作战展开、作战实施、作战结束等阶段，对航空保障装备的需求、调配、使用、机动等要素，进行有针对性的预测、计划、指挥、控制和协调，目的是充分发挥航空保障装备整体的作战保障效能，实现与作战任务的最佳匹配。

2. 航空保障装备作战运用的特点

在航空保障装备作战运用过程中应该重点把握以下特点规律。

(1) 预先筹划，精确保障。战时航空保障装备需求类型品种多、数量规模大，且与平

时保障有较明显不同，只有根据不同作战行动特点和任务需要，精确预测航空保障装备需求，统一筹划各类保障装备，缩小保障和需求的差距，才能在准确的时间、准确的地点提供准确的航空保障装备，实现精确保障。

(2) 机动伴随，敏捷保障。为保证航空装备的机动作战能力，航空保障装备必须与主战装备全程伴随，快速机动，实施敏捷保障。

(3) 动态调配，持续保障。现代航空兵作战，参战装备数量多、强度大，对抗激烈，对航空保障装备需求明显增加；同时，战时航空保障装备自身故障、损伤也会急剧增加，为保持持续战斗力，需要不断补充调配航空保障装备，及时进行战伤抢修，确保持续作战能力。

(4) 协同配合，联合保障。现代航空兵作战，是多兵机种的联合作战，航空保障装备不是单一机型保障装备的简单叠加，应整合不同军兵种、不同机型的民航航空保障装备进行合理编组，相互补充、相互衔接，实现互相支援、协调一致的联合保障。

2.4.2 航空保障装备典型作战运用模式

航空保障装备典型作战运用模式是指航空装备维修机构作战时组织、使用和部署航空保障装备所采取的方法和形式，与保障任务、保障对象和保障需求等密切相关。从配置机动性的角度，通常包括以下几种典型模式。

1. 固定作战运用模式

固定作战运用模式一般是指建制内的装备维修机构配置在固定的机场，运用所属作战单元的航空保障装备实施维修保障活动。在这种模式中，装备维修机构、保障装备和保障对象之间的保障关系明确，长期一起相互协同和配合，组织和实施比较方便，但保障的机动能力较差。该模式一般适应于靠近作战方向前沿或者所配属的航空装备作战半径较大的任务作战单元。

2. 伴随作战运用模式

伴随作战运用模式一般是指装备维修机构需要采取空转或者地转的方式，携行全部或者大部分航空保障装备随同作战单元或分队一起行动，直接为作战单元航空装备提供维修保障的方式。在这种模式中，需要针对保障任务需要，分专业、内外场制订航空保障装备机动携行清单和装载方案。这种模式可以最大限度地消除保障力量、航空保障装备和航空装备之间的时间和空间差，从作战编成和行动上实现作战力量和保障力量的一体化，提供最及时和最佳的保障，其缺点是机动保障规模大。该模式一般适用于由于作战需要，需要将作战力量和保障力量前推到缺乏航空保障装备支持的其他机场，甚至是民航或国外机场。

3. 预置作战运用模式

预置作战运用模式是指为了满足作战保障任务的需要，装备维修机构不携行或携行少

部分航空保障装备实施机动，主要使用预先放置在目标机场的航空保障装备实施维修保障活动的方式。通常预置的是作战单元机动时不便携行或多机种综合保障的航空保障装备，主要供担负中转、作战和驻训维修保障任务的维修机构使用。面对未来作战需求，应在作战单元经常性轮战驻训点和综合保障基地开展预置工作，梳理预置需求，建立航空保障装备预置库，减少作战单元转场携行运载量。很明显，这种模式既有伴随作战的优势，又可以减少保障规模，但存在多机种预置工作量非常大、预置装备利用率不高等问题。

4. 支援作战运用模式

支援作战运用模式是指作战单元因战时损耗、故障或保障任务的变化导致航空保障装备数量不足、功能性能不满足需求，同时自主保障能力有限时，需要上级提供航空保障装备补充、调配，兄弟修理机构、研究院所、工厂提供航空保障装备的技术服务和支援。这种模式能充分发挥整个保障体系的优势，最大限度支援作战，但具有应急性，容易出现保障计划不周、保障沟通不畅导致效率不高的问题。

以上是战时航空保障装备的典型作战运用模式。在真正的大规模作战时，航空保障装备体系应该在一个更大的战场空间里进行计划、指挥和控制，其作战运用模式应该综合运用，实现优势互补。

航空保障装备体系结构设计

从体系的视角认识和把握航空保障装备体系的整体构成，是加强信息化条件下航空保障装备发展建设的必然要求。本章在对航空保障装备体系结构设计进行概述的基础上，借鉴 DoDAF 2.0 视图模型和能力需求论证方法，提出了基于视图分析的航空保障装备体系结构设计方法，并通过信息化航空维修保障装备体系结构设计示例进行说明。

3.1 航空保障装备体系结构设计概述

航空保障装备体系概念的产生与发展，既有系统科学深入发展的理论背景及航空装备成体系发展的现实驱动，也有在航空保障装备快速、机动、经济保障要求下成体系建设的现实需求。结合航空保障装备的特点，参考各种关于体系的定义，航空保障装备体系可以定义为：由相互关联、功能互补的航空保障装备或航空保障装备系统，按照能力需求牵引、综合集成优化原则形成的，支撑航空装备体系保障功能的有机整体。航空保障装备体系具有如下特点。

（1）整体性。航空保障装备体系构成要素之间相互协同和互为补充，并且通过整体上的持续优化，形成功能齐全、序列配套、精干敏捷、费用可控的有机能力整体，确保航空保障装备体系效能最大化。

（2）层次性。航空保障装备体系是一个多层次的大系统，可以根据保障级别、保障对象（机型）、保障场所（内外场）、维修专业、价值与用途等进行划分。在研究过程中，可以视情选取航空保障装备体系的层次。

（3）复杂性。航空保障装备体系是一个复杂的大系统。一是航空保障装备体系的构建涉及论证、设计、研制、生产、部署和使用的全寿命周期过程；二是航空保障装备体系涉及的数量和种类繁多、接口和技术体制复杂。

（4）配套性。航空保障装备体系的配套性是由航空保障装备的配属保障地位决定的。航空保障装备体系应满足航空装备体系的保障要求，与航空装备体系同步论证、同步研制、同步生产、同步交付。

(5) 发展性。航空保障装备体系是不断演化发展的, 演化的动力既来源于航空装备体系的发展与作战保障需求的变化, 也来源于信息化条件下航空保障装备体系能力建设的内在要求。

航空保障装备体系包括体系结构、数量规模、质量特性、技术水平和运用方式等要素或属性。其中, 航空保障装备体系结构是指航空保障装备体系的组成及组成要素之间的交联关系。航空保障装备体系结构设计是指面向航空保障装备体系的任务和能力需求, 生成满足平时与战时保障需求的航空保障装备体系组成、结构关系的过程。

通过上面的分析可以看出, 航空保障装备体系结构设计是航空保障装备体系建设的逻辑起点, 也是其发展规划和总体设计的前提和基础。

3.2 基于视图分析方法的航空保障装备体系结构设计

航空保障装备数量和种类繁多、相互关系复杂, 需要基于相应体系结构设计规范, 根据能力需求确定航空保障装备体系结构。国外典型的体系结构分析方法有美国国防部体系结构框架 DoDAF、英国国防部体系结构框架 MoDAF 和北约框架 NAF。本章借鉴 DoDAF 2.0 的基本思想和基于能力的需求论证策略, 对 DoDAF 进行了剪裁和改造, 构建基于视图分析方法的航空保障装备体系结构设计方法, 用于分析“作战单元保障任务需求—航空保障装备体系能力需求—航空保障装备需求”映射过程及其输出产品。

3.2.1 DoDAF 视图分析方法

美军 DoDAF 体系结构框架是一种重要的武器装备体系建模标准, 对于保障武器装备系统之间可集成性、可互操作性具有重要的借鉴意义。美国国防部体系结构框架工作组在 DoDAF 1.5 的基础上, 借鉴分布式计算领域面向服务建模思想、SOA 相关研究成果及同时期其他国家和组织体系结构框架研究成果, 在 2009 年 5 月颁布了 DoDAF 2.0。

DoDAF 2.0 的核心思想是多视角观点, 单个视角只是对体系需求某一方面的单张照片, 仅能反映研究对象的某个局部特征; 而由多个视角则能构成装备体系需求的“全息影像”, 可全面真实“立体”地反映整个装备体系的全部特征。DoDAF 2.0 将其描述的模型组织为 8 个视角。

(1) 全视角 (All Viewpoint)。全视角即与所有视角相关的体系结构描述的顶层概貌, 包括 AV-1 (概要信息)、AV-2 (集成词典) 两个视图。

(2) 能力视角 (Capabilities Viewpoint)。能力视角集中反映了与整体构想相关的企业目标, 这些构想是指在特定标准和条件下进行特定的行动过程或是达成期望效果的能力。它们综合使用各种手段和方式来完成一组任务, 包括 CV-1 (能力愿景)、CV-2 (能力分类)、

CV-3（能力阶段）、CV-4（能力依赖）、CV-5（能力—组织开发映射）、CV-6（能力—作战行动映射）、CV-7（能力—服务映射）7个视图。

（3）数据和信息视角（Data and Information Viewpoint）。数据和信息视角集中反映了体系结构描述中的业务信息需求和结构化业务流程规则，包括 DIV-1（概念数据模型）、DIV-2（逻辑数据模型）、DIV-3（物理数据模型）3个视图。

（4）作战视角（Operational Viewpoint）。作战视角集中反映了完成国防部使命的机构、任务或执行的行动及彼此必须交换的信息，包括 OV-1（高层作战概念图）、OV-2（作战资源流描述）、OV-3（作战资源流矩阵）、OV-4（组织机构关系图）、OV-5a（作战活动分解树）、OV-5b（作战活动模型）、OV-6a（作战规则模型）、OV-6b（作战状态转换模型）、OV-6c（作战时间跟踪描述）9个视图。

（5）项目视角（Project Viewpoint）。项目视角集中反映了项目是如何有机地组织成一个采购项目的有序组合，包括 PV-1（项目组合关系）、PV-2（项目时间进度）、PV-3（项目—能力映射）3个视图。

（6）服务视角（Service Viewpoint）。服务视角集中反映了为作战行动提供支撑的系统、服务和相互交织的功能，包括 SvcV-1（服务背景描述）、SvcV-2（服务资源流描述）、SvcV-3a（系统—服务矩阵）、SvcV-3b（服务—服务矩阵）、SvcV-4（服务功能描述）、SvcV-5（作战活动—服务跟踪矩阵）、SvcV-6（服务资源流矩阵）、SvcV-7（服务度量矩阵）、SvcV-8（服务演进描述）、SvcV-9（服务技术和技能预测）、SvcV-10a（服务规则模型）、SvcV-10b（服务状态转换描述）、SvcV-10c（服务事件跟踪描述）13个视图。

（7）标准视角（Standards Viewpoint）。标准视角是用来管理系统各组成部分或要素的编排、交互和相互依赖的规则的最小集，包括 StdV-1（标准概览）、StdV-2（标准预测）两个视图。

（8）系统视角（System Viewpoint）。系统视角集中反映了支持作战行动中的支撑自动化系统、相互交织性和其他系统功能的信息，包括 SV-1（系统接口描述）、SV-2（系统资源流描述）、SV-3（系统—系统矩阵）、SV-4（系统功能描述）、SV-5a（作战活动—系统功能跟踪矩阵）、SV-5b（作战活动—系统跟踪矩阵）、SV-6（系统资源流矩阵）、SV-7（系统度量矩阵）、SV-8（系统演进描述）、SV-9（系统技术和技能预测）、SV-10a（系统规则模型）、SV-10b（系统状态转换描述）、SV-10c（系统事件跟踪描述）13个视图。

3.2.2 航空保障装备体系结构设计的视图模型

根据 DoDAF 2.0 中的视图模型，结合航空保障装备体系的特点，剪裁定义航空保障装备体系结构设计的视图产品集合、视图关系模型、视图生成逻辑顺序模型。

1. 视图产品集合

视图是基于能力的航空保障装备体系结构设计的重要途径和描述方法，是某一视

角的外部表示，其表示方式也可以有很多种。通过视角下不同的视图集可形成对航空保障装备体系结构需求的具体描述。因此，构建视图的描述模型就是该方法框架的主要环节。

结合航空保障装备体系的特点，根据 DoDAF 2.0 中的视角，重点以作战视角、系统视角、能力视角为基础，剪裁确定了 3 个关键视图集，即保障任务视图集（Support Operation View, SOV）、保障能力视图集（Support Capability View, SCV）、保障装备视图集（Support Equipment View, SEV）。航空保障装备体系结构设计的每个视图集内分别采用了若干个视图产品，以形成视图描述模型，如表 3-1 所示。

表 3-1 航空保障装备体系结构设计的视图产品集合

| 序号 | 视图集名称 | 对应视角 | 视图产品名称 | 视图产品代号 | 概要描述 | 产品类型 |
|----|--------------|------|------------------|--------|--|------|
| 1 | 保障全视图集(SAV) | 全视角 | 概要和摘要信息 | SAV-1 | 航空保障装备体系范围、用途、预期用户、背景、条件、分析和结论等 | 基本产品 |
| 2 | 保障任务视图集(SOV) | 作战视角 | 高级保障概念 | SOV-1 | 对保障任务的顶层保障概念的图形和文本描述 | 基本产品 |
| 3 | | | 保障节点信息流描述 | SOV-2 | 保障节点及节点间交换的信息流的描述 | 基本产品 |
| 4 | | | 保障信息流交换描述 | SOV-3 | 保障信息及交换的信息及其相关属性描述 | 基本产品 |
| 5 | | | 组织机构关系模型 | SOV-4 | 保障组织体系构成及组成部分之间的关系 | 基本产品 |
| 6 | | | 保障活动分解模型 | SOV-5a | 按等级结构组织在一起的保障任务 | 基本产品 |
| 7 | | | 保障活动关系模型 | SOV-5b | 保障活动之间的输入和输出关系 | 基本产品 |
| 8 | 保障能力视图集(SCV) | 能力视角 | 保障能力战略构想 | SCV-1 | 描述未来作战行动中对保障能力需求、战略发展构想，阐述其战略背景和高层范围 | 基本产品 |
| 9 | | | 保障能力构成 | SCV-2a | 提供某一个时间段内，保障所需要的各种能力和子能力的结构化列表，描述能力的分类、组成、子能力划分与从属关系，以及能力的定义 | 基本产品 |
| 10 | | | 航空保障装备体系能力构成 | SCV-2b | 提供某一个时间段内，保障装备体系所需要的各种能力和子能力的结构化列表，描述能力的分类、组成、子能力划分与从属关系，以及能力的定义 | 基本产品 |
| 11 | | | 航空保障装备体系能力依赖关系描述 | SCV-3 | 描述保障能力与能力之间、同一能力的子能力之间的依赖、协同、支撑等关系，并确定其逻辑分组 | 基本产品 |

(续表)

| 序号 | 视图集名称 | 对应视角 | 视图产品名称 | 视图产品代号 | 概要描述 | 产品类型 |
|----|---------------|------|-----------------------|--------|--|------|
| 12 | 保障能力视图集 (SCV) | 能力视角 | 航空保障装备体系能力与保障活动映射关系 | SCV-4 | 描述航空保障装备体系能力与保障任务及活动的支撑与实现关系,确定航空保障装备体系能力分析 with 保障活动分析的连接关系 | 基本产品 |
| 13 | | | 航空保障装备体系能力规划 | SCV-5 | 描述航空保障装备体系能力在不同时间点或不同时间段内要达到的保障能力,即能力分段 | 辅助产品 |
| 14 | 保障装备视图集 (SEV) | 系统视角 | 航空保障装备体系构成描述 | SEV-1 | 描述航空保障装备的体系分类结构,可从航空保障装备的功能、形态等分类 | 基本产品 |
| 15 | | | 航空保障装备与航空保障装备体系能力映射关系 | SEV-2 | 描述航空保障装备对航空保障装备体系能力需求的支持 | 基本产品 |
| 16 | | | 航空保障装备与保障活动映射关系 | SEV-3 | 描述航空保障装备对携行保障活动的支持 | 基本产品 |
| 17 | | | 航空保障装备战术技术指标 | SEV-4 | 描述具体航空保障装备的性能及战术技术指标 | 基本产品 |
| 18 | | | 航空保障装备发展描述 | SEV-5 | 航空保障装备的发展路线,用于描述航空保障装备建设的规划和计划 | 辅助产品 |

2. 视图关系模型

上面建立的视图描述模型只是建立了基于能力的航空保障装备体系结构设计所需的视图产品,并没有说明各个视图产品的关系。为此,构建了如图 3-1 所示的航空保障装备体系结构设计的视图关系模型。该模型基于“多视角”理论的观点,选取每一个视角下的基本视图产品,构建了基于能力的航空保障装备体系结构设计所需视图的整体关系。该视图关系模型用于表示“作战单元保障任务需求—航空保障装备体系能力需求—航空保障装备需求”映射过程及其输出产品。其中,最重要的目标输出为航空保障装备体系构成描述(SEV-1),其他视图为中间产品。

视图描述模型中各种视图产品并不是孤立的实体,而是要通过一些要素将保障任务视图产品、保障能力视图产品、保障装备视图产品连接起来,形成相互连接和有逻辑关系的产品生成过程。这种连接和逻辑关系的存在,是因为各种视图产品之间存在“数据流动”,即“数据链”将各个视图产品连接起来。为此,根据各个视图产品的本质属性及相互数据关系,构建了基于数据链的航空保障装备体系结构设计视图产品关系模型,如图 3-2 所示。

通过构建基于数据链的航空保障装备体系结构设计视图产品关系模型,建立了“保障能力视图产品—保障任务视图产品—保障装备视图产品”之间的相互支持、相互约束及相互依赖关系。通过视图产品关系模型的描述,保证了航空保障装备体系结构设计的一致性、合理性、科学性和有效性,为体系结构的生成和集成提供了基础。

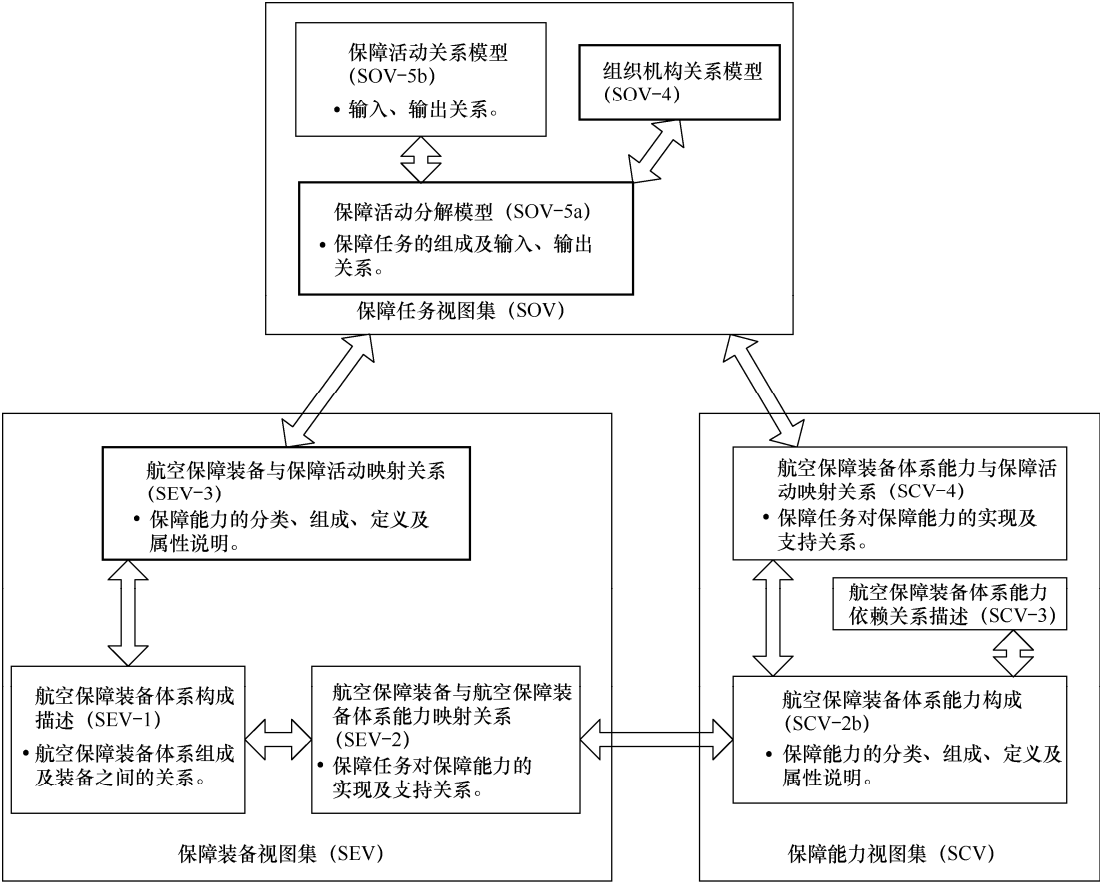


图 3-1 航空保障装备体系结构设计的视图关系模型

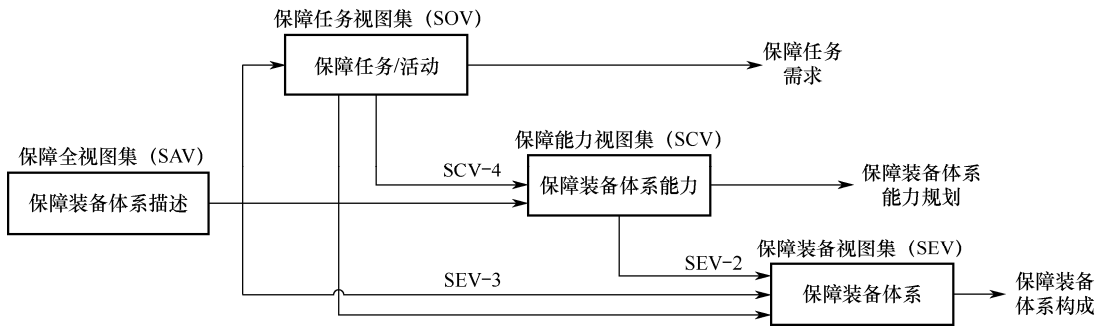


图 3-2 基于数据链的航空保障装备体系结构设计视图产品关系模型

3. 视图开发的逻辑顺序模型

关系模型只是建立视图产品的关系，视图集下所属各种视图产品的开发也存在一定的逻辑顺序。根据航空保障装备体系的特点，建立了航空保障装备体系结构设计的视图产品开发逻辑模型，如图 3-3 所示。依此逻辑开发相应视图，能够保证航空保障装备体系结构整体设计的逻辑性、完整性和鲁棒性。

息收集、信息存储、信息传输、信息分析、信息发布”。下面重点分析保障任务视图集下的组织机构关系模型（SOV-4）、保障活动分解模型与关系模型（SOV-5）。

1. 组织机构关系模型（SOV-4）

信息化条件下基本作战单元航空维修保障部门应突出信息化主导，专业化、精细化管理职能，设立基于信息系统的融合指挥、计划、质量控制、安全监察、训练等职能于一体的组织机构，如图 3-4 所示。

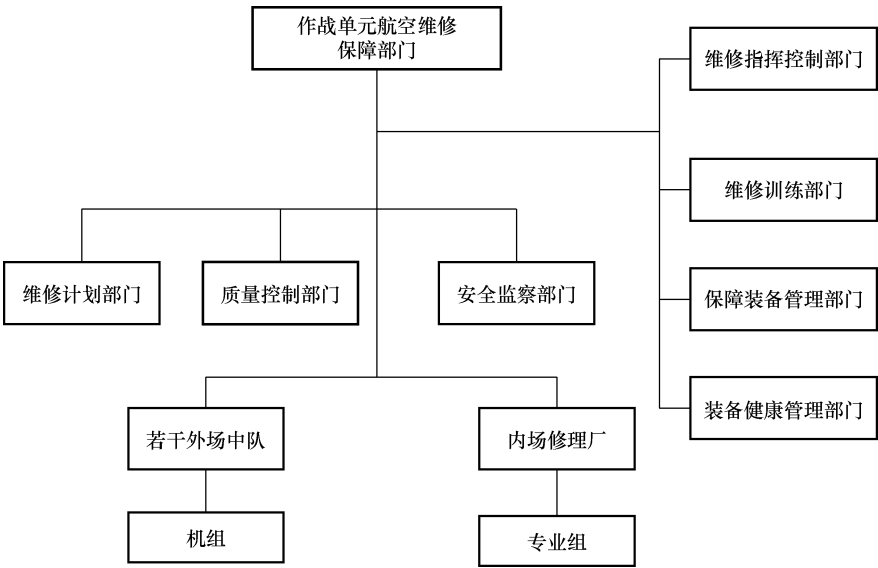


图 3-4 组织机构关系模型

从部署位置上来看，维修计划、质量控制、安全监察、维修训练、内场修理等部门一般设在内场；外场中队及维修指挥控制、保障装备管理、装备健康管理等部门一般设在外场。

2. 保障活动分解模型与关系模型（SOV-5）

保障活动（任务）模型视图包括保障活动分解模型（SOV-5a）和保障活动关系模型（SOV-5b）两个视图。其中，SOV-5a 反映了保障活动的纵向结构树；SOV-5b 反映了每一级别中各保障活动之间关系的横向关系。在本示例中，首先建立信息化航空维修保障活动的纵向结构树，即 SOV-5a；然后根据活动分解树，建立活动关系描述模型 SOV-5b，从而通过信息流将信息化航空维修保障活动形成完整的流程。

在本示例中，根据可能承担的航空维修保障任务活动，将顶层信息化航空维修保障活动分解为维修指挥控制、质量控制、外场一线管理、状态监控、维修训练等五大类，构建信息化航空维修保障活动分解模型（SOV-5a），如图 3-5 所示。每一类大项任务活动还可以向下分解，如 A.4 状态监控包括：

- (1) 飞参判读，提供飞参数据快速判读、处理、查看、回放等功能。
- (2) 发动机状态监控，按照发动机使用管理有关规定，通过处理、分析飞参数据、油液数据及其他检测数据，了解、掌握在发动机使用过程中存在的异常情况，开展视情维修，确保发动机的安全使用。
- (3) 空中状态监控，提供实时空中飞机飞行情况和状态信息监控功能。

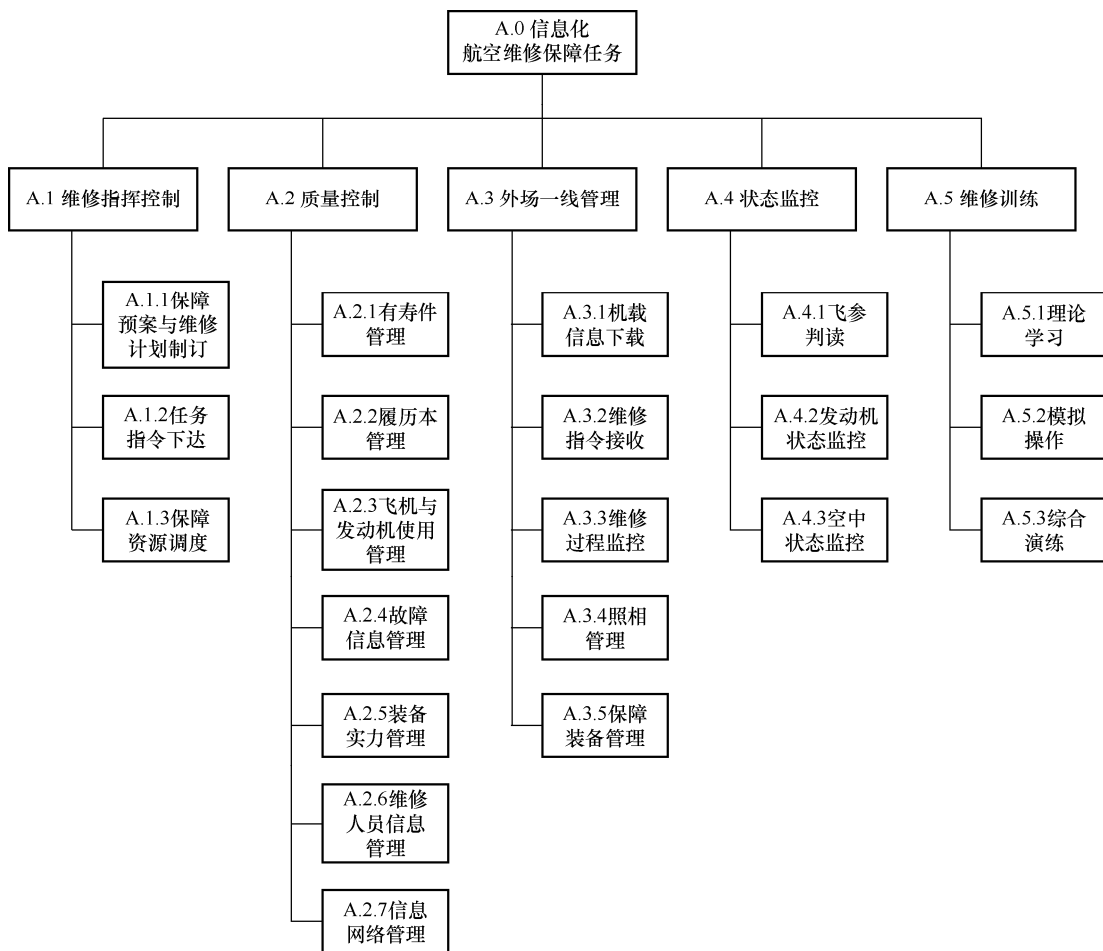


图 3-5 信息化航空维修保障活动分解模型 (SOV-5a)

根据任务之间的时序逻辑，构建相应的维修保障活动关系模型 (SOV-5b)，如图 3-6 所示。特别说明的是，由于上述信息化航空维修保障活动并不是独立存在的，而是融合在飞行保障、维修保障及业务管理中的，时序关系并不是非常严格的，因此本章构建的维修保障活动关系模型是非严格的。

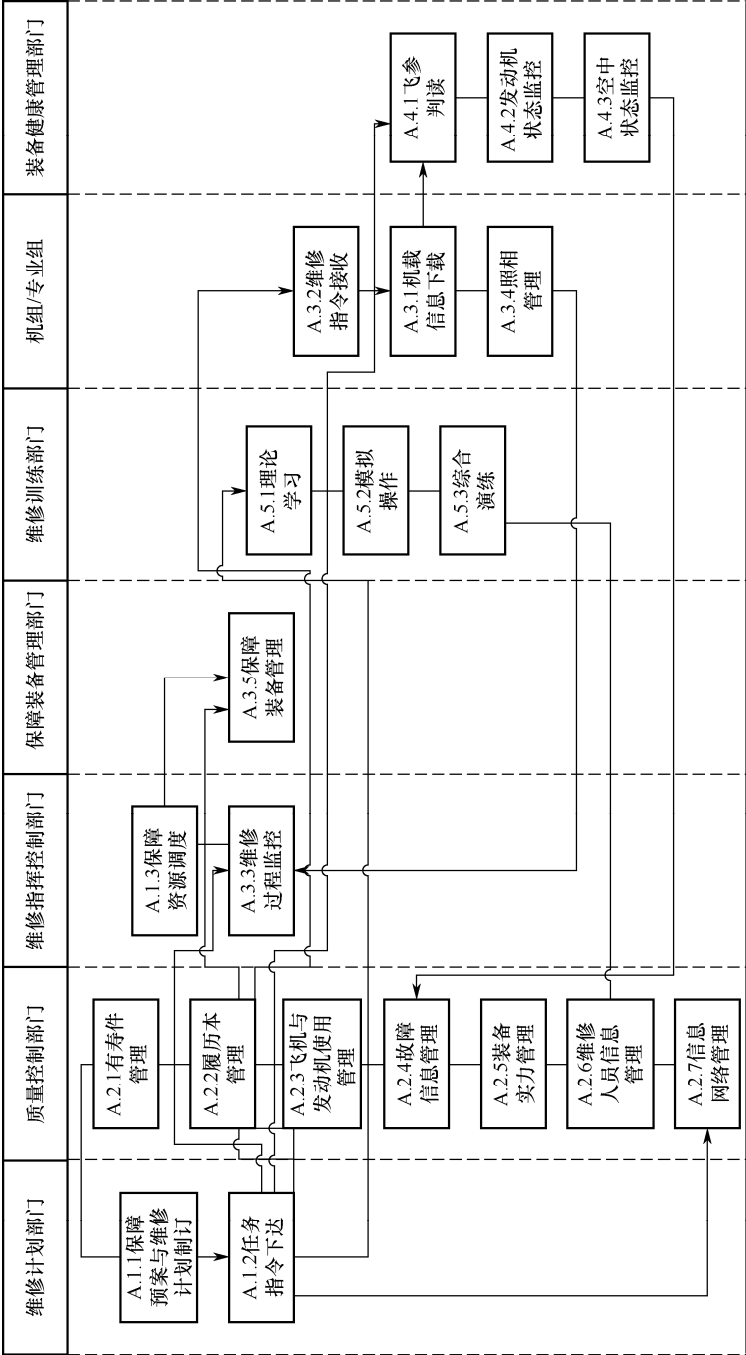


图 3-6 维修保障活动关系模型 (SOV-5b)

3.3.3 信息化航空维修保障能力视图集

在信息化条件下，航空维修保障装备体系能力需求分析是基本作战单元航空维修保障部门信息化维修保障能力的描述和分析，主要采用保障能力视图集（SCV）来描述。

1. 信息化航空维修保障能力战略构想（SCV-1）

（1）保障指挥自动化能力。保障指挥自动化能力能够依托网络下达保障指令，适时掌握航空装备工作状态，指挥和调度保障资源，向上级提供保障决心和保障态势。

（2）维修信息管理能力。维修信息管理能够采集航空装备、维修保障工作相关信息，完成汇总上报和统计分析，掌握航空装备质量情况和航空维修保障质量。

（3）维修辅助决策能力。维修辅助决策能力能够实现航空维修保障部门维修过程管理数字化，提供维修保障态势查看、维修计划辅助决策、维修作业过程管理等功能。

（4）航空装备健康状态综合监控能力。航空装备健康状态综合监控能力能够通过机载健康数据、飞参数据、油液分析及历史故障数据的收集与分析，基于预测与健康管理的的手段与方法，实时或事后实现飞机及发动机的健康状态监控、健康评估和故障预测。

（5）维修训练能力。维修训练能力是指根据航空维修训练有关法规，运用信息化手段开展维修训练，同时能收集和管理日常航空维修训练计划、内容、进度相关信息，并组织考核。

（6）网络通信能力。网络通信能力是指运用各种先进的通信手段（有线/无线），形成一个纵横相连，上下互通，安全可靠的网络环境，为航空维修保障活动的顺利开展提供信息基础。

2. 信息化航空维修保障能力构成（SCV-2a）

根据上述分析，采用树状图进行分析和描述信息化航空维修保障能力构成（SCV-2a），如图 3-7 所示。该视图是经过循环反馈后的最终结果。

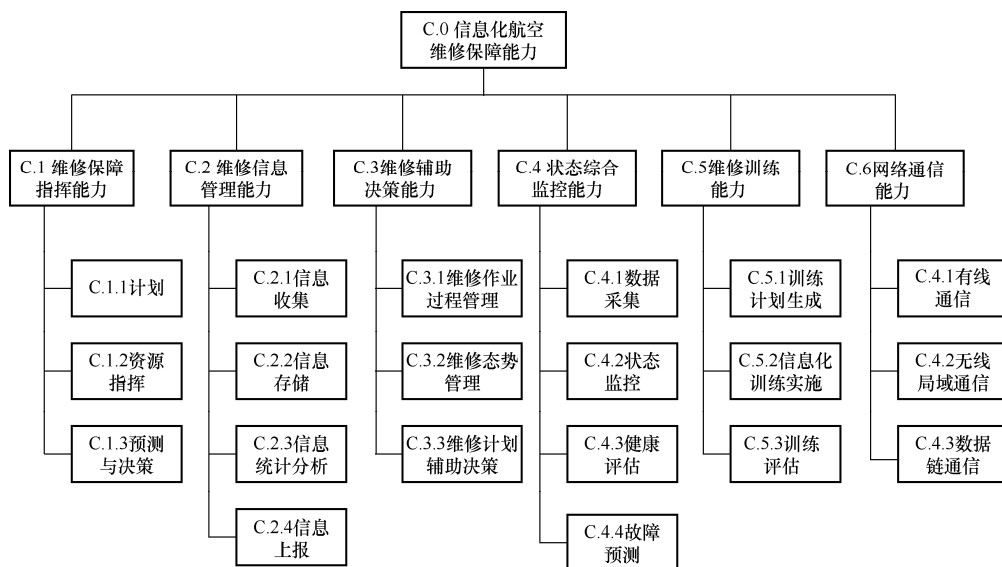


图 3-7 信息化航空维修保障能力构成（SCV-2a）

3. 信息化航空维修保障装备体系能力构成（SCV-2b）

信息化航空维修保障能力不完全是通过信息化保障装备予以实现的，还包括维修人员、软件系统、飞机本身的信息化保障设计等其他因素。因此，聚焦信息化航空维修保障装备因素，对图 3-7 所示的信息化航空维修保障能力构成（SCV-2a）进行剪裁和凝练，形成信息化航空维修保障装备体系能力构成（SCV-2b），如图 3-8 所示。

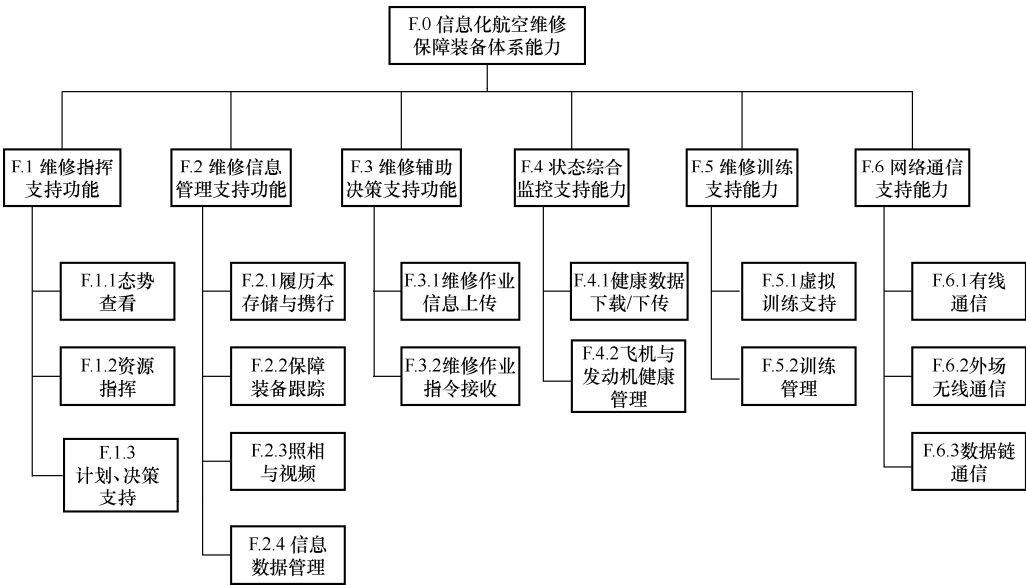


图 3-8 信息化航空维修保障装备体系能力构成（SCV-2b）

4. 信息化航空维修保障装备体系能力依赖关系描述（SCV-3）

通过能力依赖关系的描述，可以分析信息化航空维修保障装备体系能力的依赖、协同、支撑等关系，发现核心能力，并确定其逻辑分组。信息化航空维修保障装备体系的一级能力依赖关系如图 3-9 所示，二级能力依赖关系如图 3-10 所示。图 3-10 是经过循环反馈后的最终结果。

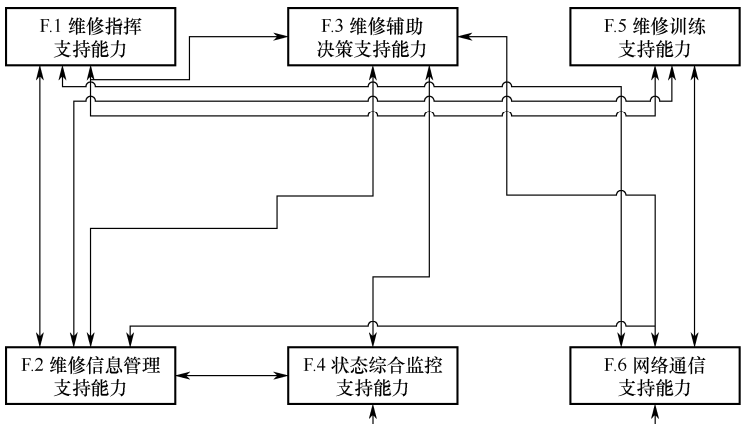


图 3-9 信息化航空维修保障装备体系的一级能力依赖关系

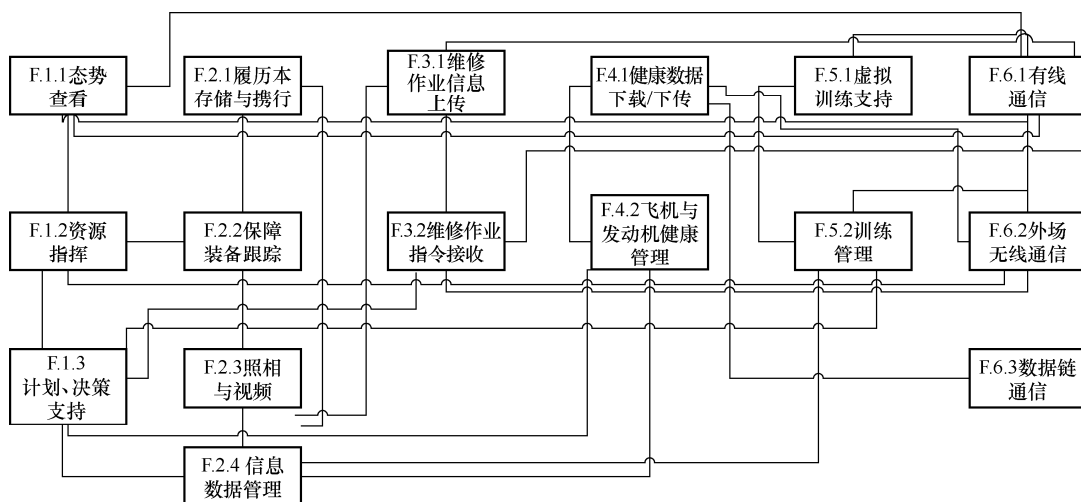


图 3-10 信息化航空维修保障装备体系的二级能力依赖关系

通过对图 3-9 的连通性分析可以看出，维修指挥支持、维修信息管理支持、维修辅助决策支持、网络通信支持等能力的结构重要度相对较高。通过对图 3-10 的连通性分析可以看出，信息化航空维修保障装备体系的二级能力之间的依赖程度较高。因此，对于能力需求的满足是全方面的，否则可能会因为某方面的能力缺陷影响其他方面的能力。

5. 信息化航空维修保障装备体系能力与信息化保障活动映射关系（SCV-4）

本视图产品是在构建完成 SOV 相关视图产品后，通过映射矩阵，建立信息化航空维修保障装备体系能力（矩阵行）与信息化航空维修保障活动（矩阵列）的关联关系，根据相互关联程度可分为 3 个等级：1-Important（重要关系）、2-Nonessential（一般关系）、3-Low（微弱关系或没有关系）。在矩阵分析过程中，可以对信息化航空维修保障装备体系能力和信息化保障活动进行完善优化，形成一次反馈。受篇幅限制，表 3-2 为信息化航空维修保障装备体系能力与信息化航空维修保障活动的部分映射关系。

表 3-2 信息化航空维修保障装备体系能力与信息化航空维修保障活动的部分映射关系（SCV-4）

| 活动 能力 | A.1.1 | A.1.2 | A.1.3 | A.2.2 | A.2.3 | A.2.4 | A.2.5 | A.2.6 | A.3.1 | A.3.2 | A.3.3 | A.3.4 | A.4.1 | A.4.2 | A.5.1 | A.5.2 | A.5.3 |
|----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| F.1.1 | | | 2 | | | | 2 | 2 | | | | 2 | | | | | |
| F.2.1 | | | | | 1 | | | | | | | | | | | | |
| F.3.1 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| F.4.1 | | | | | | | | | | | | | 1 | 1 | | | |
| F.5.1 | 2 | | | | | | | | | | | | | | 1 | 1 | 1 |
| F.6.1 | 1 | 1 | 1 | 1 | | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |

注：没有标注映射关系的，默认为微弱关系或没有关系

通过该视图产品分析，能辅助确定是否覆盖了所有信息化航空维修保障任务需求，是否所有任务需求都有足够的的能力进行支撑；也可以分析能力需求的重要度。

3.3.4 信息化航空维修保障装备视图集

将建立的任务视图产品和能力视图产品映射到信息化航空维修保障装备体系上，可得到信息化航空维修保障装备体系需求。

1. 信息化航空维修保障装备与信息化航空维修保障装备体系能力映射关系（SEV-2）

将信息化航空维修保障装备体系能力需求映射为信息化航空维修保障装备的需求。受篇幅限制，表 3-3 给出了部分映射结果。通过该视图的分析，可以核查是否缺少必要的信息化航空维修保障装备。

表 3-3 信息化航空维修保障装备与信息化航空维修保障装备体系能力的部分映射关系（SEV-2）

| <div>能力</div> <div>保障装备</div> | F.1.1 | F.1.2 | F.1.3 | F.2.1 | F.2.2 | F.2.3 | F.3.1 | F.3.2 | F.4.1 | F.4.2 | F.5.1 | F.5.2 | F.6.1 | F.6.2 | F.6.3 |
|-------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 机务指挥控制设备 | √ | √ | √ | | | | | | | | | | √ | √ | √ |
| 飞参处理设备 | | | | | | | | | | √ | | | √ | √ | |
| 发动机综合监控设备 | | | | | | | | | | √ | | | √ | √ | |
| 维修支持终端（PMA） | | | | | | | √ | √ | √ | | √ | | √ | √ | |
| 履历本柜射频管理装置 | | | | √ | | | | | | | | | | | |
| 桌面维修训练装置 | | | | | | | | | | | √ | √ | | | |
| 机动式维修信息网设备 | | | | | | | | | | | | | | √ | |
| 飞机综合信息采集装置 | | | | | | | | | √ | | | | | | |
| 维修作业质量照相管理设备 | | | | | | √ | | | | | | | | | |

2. 信息化航空维修保障装备与信息化航空维修保障活动映射关系（SEV-3）

在构建 SEV-2 视图产品的基础上，构建信息化航空维修保障装备与信息化航空维修保障活动映射关系（SEV-3）（受篇幅限制，映射关系表略）。通过该视图的分析，能再次核查确认所有信息化保障活动都得到必要的信息化航空维修保障装备的支持。

3. 信息化航空维修保障装备体系构成描述（SEV-1）

通过 SEV-2、SEV-3 视图产品的构建，可以较为完整地确定信息化航空维修保障装备的体系需求。按照功能进行梳理，形成如图 3-11 所示的信息化航空维修保障装备体系构成描述（SEV-1）。

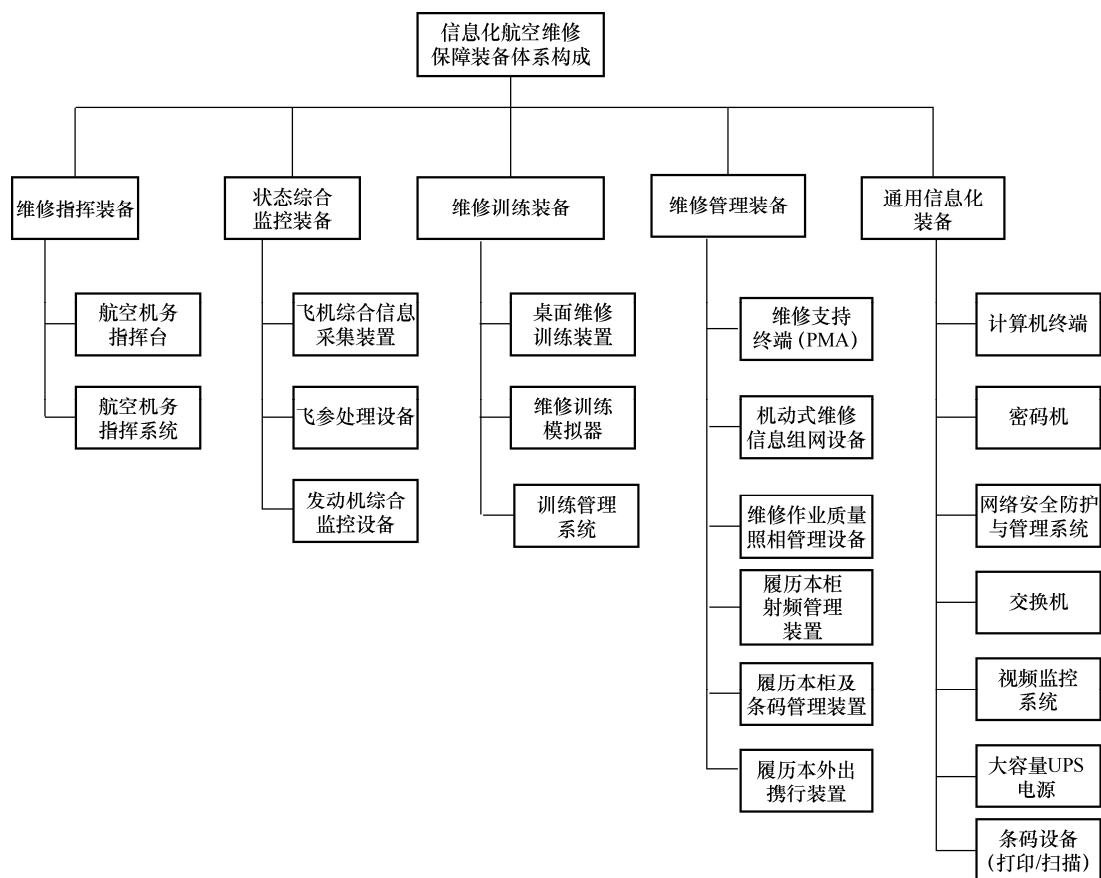


图 3-11 信息化航空维修保障装备体系构成描述

面向未来信息化航空维修保障能力需求，通过对当前信息化航空维修保障装备体系能力进行初步评估（过程略），可以发现现阶段主要在航空维修指挥、维修训练、健康管理能力等方面存在较大差距，具体表现在航空维修机动指挥、计划筹划、虚拟训练、健康评估与预测等任务活动支撑上。因此，在后续信息化航空维修保障装备体系发展上，应该加强航空维修机动指挥车、嵌入任务规划的维修指挥台、机动式维修信息组网设备、虚拟维修训练设备、综合健康管理设备的发展。

航空保障装备型谱优化

航空保障装备型谱设计与优化是一项复杂的系统工程，型谱方案的优劣会对当前乃至未来较长一段时间内航空保障装备的规划、发展及体系效能产生直接影响。在构建航空保障装备型谱重要度评估指标体系的基础上，本章提出了一种基于重要度评估和群体智能的型谱优化方法。该方法运用专家群组灰色聚类 and 熵权法进行评估指标综合赋权，以航空保障装备型谱重要度评估为依据，以优化费用为约束条件，采用多种群遗传算法实现航空保障装备的集成和优选。最后通过某类航空保障装备型谱优化案例研究，验证了型谱优化方法的可行性。

4.1 航空保障装备型谱优化概述

4.1.1 型谱优化的意义

航空保障装备型谱优化是指对完成特定功能的航空保障装备类型、规格进行综合集成优化，以形成满足当前乃至未来较长一段时间内更加合理的型谱系列的过程。

航空保障装备型谱优化方案是当前及未来较长一段时期内航空保障装备的指南，充分体现了航空保障装备发展的阶段性、继承性和持续性。因此，开展航空保障装备型谱优化技术研究，对于提高航空保障装备型谱编制的科学性和有效性具有重要意义，主要体现在以下几个方面。

一是通过型谱优化研究，调查分析航空保障装备的类别和规格，进行整理、归纳，可以准确地了解目前航空保障装备配备现状，发现航空保障装备保障效能的不足，为航空保障装备的发展与完善提供需求牵引。

二是通过型谱优化研究，总结型谱系列规范化技术，支撑航空保障装备全寿命周期过程活动，为新型航空装备研制、作战能力形成、现役航空装备保障能力提升提供基础。

三是通过型谱优化研究，规划航空保障装备型谱，明确不同时期、不同阶段技术发展的重点和要求，为未来航空保障装备的可持续发展起到引领作用。

4.1.2 型谱优化流程

航空保障装备型谱优化不是将现有不同规格的同类保障装备简单罗列，汇集成表格、图册或文书，而是建立具有一系列特定要求，经过集成和优选的航空保障装备系列。航空保障装备型谱优化的一般流程分为以下 3 个步骤。

第一步：航空保障装备型谱现状分析。通过整理现有航空保障装备，完成对现役航空保障装备的性能指标和成熟度等的梳理工作。

第二步：航空保障装备型谱重要度评估。航空保障装备型谱重要度评估属于航空保障装备型谱优化方案初步筛选阶段，型谱重要度反映了航空保障装备在整个型谱系列中的型谱优先级排序。

第三步：航空保障装备型谱优化。以航空保障装备型谱重要度评估为依据，以优化费用为约束条件，实现航空保障装备的集成和优选。

4.2 航空保障装备型谱重要度评估

航空保障装备型谱重要度反映了航空保障装备在整个型谱系列中的优先级排序，是航空保障装备保留、集成和优选的重要依据，也是型谱优化的输入。航空保障装备型谱重要度评估是在航空保障装备型谱现状分析的基础上，通过构建评估指标体系、评估指标信息统计、指标预处理、评估指标赋权和指标综合集结 5 个步骤进行，如图 4-1 所示。

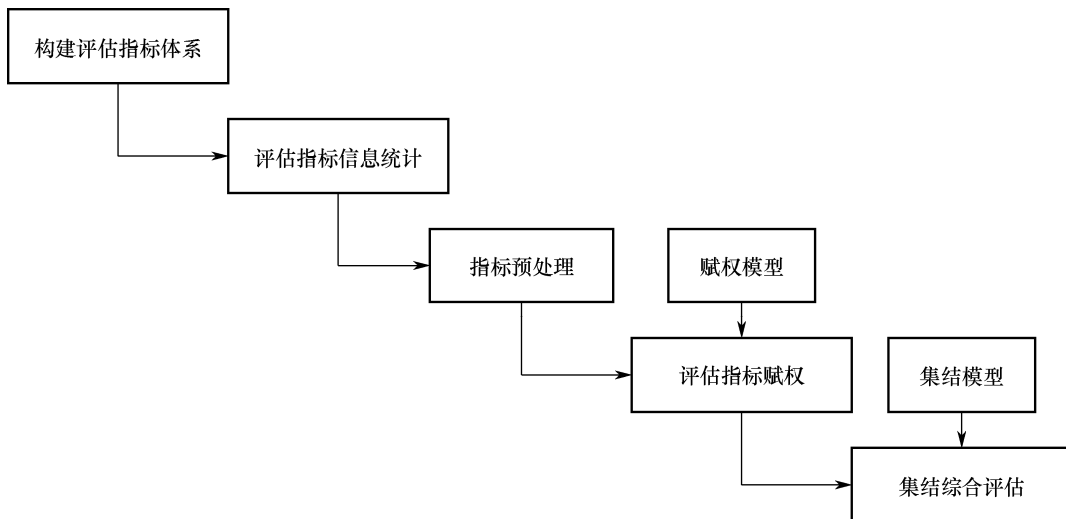


图 4-1 航空保障装备型谱评估流程

1. 构建评估指标体系

选取合适的评估指标，建立合理有效的指标体系是航空保障装备型谱重要度评估的关键。每个评估指标都要从不同的侧面反映航空保障装备型谱所具有的特征。航空保障装备型谱重要度评估指标体系的构建要遵循一定构建原则。根据构建原则将总目标进一步分解成不同的目标层和准则层，并利用定量分析与定性分析相结合的方法筛选出具体的评估指标，最终得到评估指标体系。

2. 评估指标信息统计

采用实地调研的方法，分析航空保障装备研制、生产和使用现状，拟订数据信息统计内容与表格，收集整理指标数据。

3. 指标预处理

通过评估指标筛选、类型一致化和无量纲化，实现对航空保障装备型谱重要度评估指标的预处理。一般来说，评估指标体系中可能含有极大型指标和极小型指标，即有的指标期望值越大越好，而有的指标期望值越小越好，所以对于不同类型的指标要进行一致化处理。另外，在对各指标进行评估时，各指标间可能由于量纲及量级不同而存在不可公度性，因此为了尽可能真实地反映实际情况，排除各指标由于量纲不同而带来的影响，还需要对指标进行无量纲化处理。

4. 评估指标赋权

指标的权重反映了指标在评估指标体系中的重要程度，体现了对总评估目标的贡献程度。由于各指标之间的相对重要程度不同，因此各指标的权重系数也应不同。权重系数的确定是否合理，关系到评估结果的可信度。因此，必须根据航空保障装备型谱重要度评估指标的类型与特点，构建评估指标赋权模型，对评估指标进行赋权分析。

5. 集结综合评估

在经过评估指标信息的统计分析、指标值的无量纲化处理和指标权重系数的确定等一系列准备工作之后，要选择合适的数学模型，将各评估指标合成一个整体的综合评估值，即构造集结模型，实现各个要素的有机结合，从而可以从总体的角度对航空保障装备型谱重要度进行定量的综合评估。

4.2.1 评估指标体系构建

指标体系的完善程度决定综合评估的合理性。为保证所建立的航空保障装备型谱重要度评估指标体系具有科学性和有效性，评估指标体系构建须遵循以下原则。

(1) 系统性原则。评估指标体系能够涵盖航空保障装备研制和使用的各个环节，全面反映影响航空保障装备型谱重要度的因素，以保证评估的全面性和可信度。

(2) 简洁性原则。在基本满足航空保障装备型谱重要度评估的前提下，尽量减少指标个数，选择突出反映航空保障装备型谱重要度的主要和关键指标。

(3) 可测性原则。评估指标具有可考核性和可度量性，能够清晰反映所要考核的航空保障装备型谱重要度，并且指标便于实际使用、度量含义明确，具备现实的收集渠道。

(4) 独立性原则。指标之间既要保持相互独立又要相互联系。同一级别的评估指标之间应相对独立、尽量不相关、减小交叉、防止互相包含。

(5) 一致性原则。评估指标体系应与评估目标一致，充分体现评估活动的意图，不能将与航空保障装备型谱重要度评估无关的指标选择进来。

根据航空保障装备型谱重要度评估指标体系构建原则，在调研分析的基础上，综合考虑航空保障装备研制主体、使用主体和功能、需求，建立保障装备费用、可靠性和维修性、通用化、综合化、小型化、技术性能这 6 个一级指标，并进一步细化分解为可定量描述的二级指标，从而构建出结构合理、体系完善的航空保障装备型谱重要度评估指标体系，如表 4-1 所示。

表 4-1 航空保障装备型谱重要度评估指标体系

| 一级指标 | 二级指标 | 指标定义及描述 |
|-------------|----------|---|
| 保障装备费用 | 采购费用 | 指在采购过程中所支付的各项费用，包括运输费、装卸费、保险费、包装费、仓储费，以及运输途中的合理损耗和入库前的整理挑选费 |
| | 修理费用 | 指保障装备在使用过程中，为保持和改善装备的功能和精度、维持其原有性能所发生的费用 |
| 保障装备可靠性和维修性 | 使用寿命 | 指保障装备无论从技术上考虑还是从经济上考虑都不宜再使用，而必须大修或报废时的寿命单位数 |
| | 平均故障间隔时间 | 指可修复保障装备在规定的条件下和规定的时间内，保障装备寿命单位总数与故障总数之比 |
| | 平均修复时间 | 指可修复装备在规定的条件下和规定的时间内，由故障状态修复到完好状态所需时间的平均值 |
| 保障装备通用化 | 装备配备数 | 配备给使用单位的保障装备数量 |
| | 机型适用数 | 保障装备适用机型（系列）数量 |
| 保障装备综合化 | 主要功能数 | 保障装备功能集成数量 |
| | 货架产品使用度 | 保障装备使用货架产品的数量比例 |
| 保障装备小型化 | 重量 | 保障装备重量 |
| | 体积 | 保障装备体积 |
| 保障装备技术性能 | 硬件性能 | 保障装备硬件集约化程度 |
| | 软件性能 | 保障装备软件智能化程度 |

4.2.2 评估信息收集

1. 基本原则

航空保障装备型谱重要度评估信息收集分析是开展型谱重要度评估的重要基础，信息

的真实、完整和连续与否，直接影响型谱重要度评估结果的准确性和有效性。航空保障装备型谱重要度评估指标信息收集分析应遵循以下原则。

（1）真实性。原始数据信息反映了事物的客观本质，对进一步分析、计算、验证评估指标有重要作用。因此，在数据信息收集分析中，必须妥善保存原始信息。对存疑或有问题的数据信息，经充分研究和多方比较后，才可进行更改或删除，从而保证信息的真实性和准确性，避免遗漏重要的原始信息。

（2）完整性。为了确保信息的完整性，必须建立完善的信息收集网络，涵盖航空保障装备所有的生产、使用环节和部门，确保收集到的信息完整、全面。

（3）连续性。数据信息的连续性是进行航空保障装备型谱重要度评估的关键。因此，在建立完善的航空保障装备生产使用信息收集网络的基础上，必须集中一段时间在生产厂家进行跟产、在部队进行跟训和调研，确保航空保障装备生产使用信息的连续性。

2. 收集分析表格

根据航空保障装备型谱重要度评估指标体系，结合跟产、跟训和调研，从航空保障装备费用、可靠性和维修性、通用化、综合化、小型化、技术性能这 6 个方面来展开信息收集分析工作，设计相应的表格，确保所需的信息能正确、完整、规范地收集上来。保障装备采购费用信息表、保障装备修理费用信息表、使用寿命信息表、平均故障间隔时间信息统计表、平均修复时间信息表、保障装备配备数量信息表、适用机型信息表、保障装备功能集成度信息表、货架产品使用度信息表、保障装备小型化信息表、装备技术性能信息表分别如表 4-2～表 4-12 所示。

表 4-2 保障装备采购费用信息表

| 保障装备名称 | 保障装备型号 | 采购时间 | 采购单价 | 备注 |
|--------|--------|------|------|----|
| | | | | |

表 4-3 保障装备修理费用信息表

| 保障装备名称 | 保障装备型号 | 送修时间 | 送修原因 | 修理费用 | 备注 |
|--------|--------|------|------|------|----|
| | | | | | |

表 4-4 使用寿命信息表

| 保障装备名称 | 保障装备型号 | 启封使用日期 | 报废日期 | 备注 |
|--------|--------|--------|------|----|
| | | | | |

表 4-5 平均故障间隔时间信息统计表

| 保障装备名称 | 保障装备型号 | 年度 | 工作时间 | 年故障数 | 备注 |
|--------|--------|----|------|------|----|
| | | | | | |

表 4-6 平均修复时间信息表

| 保障装备名称 | 保障装备型号 | 修理次数 | 送修日期 | 返修日期 | 备注 |
|--------|--------|------|------|------|----|
| | | | | | |

表 4-7 保障装备配备数量信息表

| 保障装备名称 | 保障装备型号 | 单位 | 上级（随装）配备数量 | 自购/借用数量 | 备注 |
|--------|--------|----|------------|---------|----|
| | | | | | |

表 4-8 适用机型信息表

| 保障装备名称 | 保障装备型号 | 适用机型数量 | 适用机型 | 备注 |
|--------|--------|--------|------|----|
| | | | | |

表 4-9 保障装备功能集成度信息表

| 保障装备名称 | 保障装备型号 | 主要功能数 | 主要功能描述 | 备注 |
|--------|--------|-------|--------|----|
| | | | | |

表 4-10 货架产品使用度信息表

| 保障装备名称 | 保障装备型号 | 总产品数 | 货架产品数 | 备注 |
|--------|--------|------|-------|----|
| | | | | |

表 4-11 保障装备小型化信息表

| 保障装备名称 | 保障装备型号 | 体积 | 重量 | 备注 |
|--------|--------|----|----|----|
| | | | | |

表 4-12 装备技术性能信息表

| 保障装备名称 | 保障装备型号 | 硬件性能描述 | 软件性能描述 | 备注 |
|--------|--------|--------|--------|----|
| | | | | |

4.2.3 评估指标预处理

通过评估指标预处理，确保航空保障装备型谱重要度评估指标的独立性、一致性和无量纲化。

1. 评估指标筛选

开展航空保障装备型谱重要度评估工作，评估指标数量要合理，一般原则是在实际评估中用尽量少的“主要”评估指标，但初期建立的指标集合中可能存在一些“次要”评估指标，这就需要进行筛选。通常采用德尔菲（Delphi）法、最小均方差法、极小极大离差法、相关系数法等方法进行指标筛选。

常用的极小极大离差法筛选原理为：对于选定的 n 个被评估对象，记为 s_1, s_2, \dots, s_n ，且每个被评估对象都可以用 m 个指标表示，记为 x_{ij} ($i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, m$)。如果被评估对象关于某项评估指标的取值相近，那么可以认定这个评估指标对开展评估工作的作用不大，可以删除，具体步骤如下。

(1) 求出各评估指标 x_{ij} 的最大离差 r_j ，即

$$r_j = \max_{1 \leq i, k \leq n} \{|x_{ij} - x_{kj}|\} \quad (4-1)$$

(2) 求出 r_j 的最小值, 即令

$$r_0 = \min_{1 \leq j \leq m} \{r_j\} \quad (4-2)$$

(3) 当 r_0 接近于零时, 则可删掉与 r_j 对应的评估指标。

2. 评估指标类型一致化

在一般情况下, 在指标集 $X = \{x_1, x_2, \dots, x_m\}$ 中, 有“极大型”“极小型”“居中型”“区间型”指标之分。因此, 需要将评估指标的类型做一致化处理, 以便评估。非极大型评估指标 x 可以通过以下方法转换为极大型评估指标。

(1) 对于极小型评估指标 x , 令

$$x^* = \frac{1}{x} \quad (4-3)$$

(2) 对于居中型评估指标 x , 令

$$x^* = \begin{cases} \frac{2(x-m)}{M-m}, & m \leq x \leq \frac{M+m}{2} \\ \frac{2(M-x)}{M-m}, & \frac{M+m}{2} \leq x \leq M \end{cases} \quad (4-4)$$

式中, M 、 m 分别为 x 的上界、下界。

(3) 对于区间型评估指标 x , 令

$$x^* = \begin{cases} 1 - \frac{q_1 - x}{\max(q_1 - m, M - q_2)}, & x < q_1 \\ 1, & q_1 < x < q_2 \\ 1 - \frac{x - q_2}{\max(q_1 - m, M - q_2)}, & x > q_2 \end{cases} \quad (4-5)$$

式中, (q_1, q_2) 为评估指标 x 的最佳稳定区间; M 、 m 分别为 x 的上界、下界。

3. 评估指标类型无量纲化

由于评估指标 x_1, x_2, \dots, x_m 之间存在量纲或量级的不同而导致指标之间的不可公度性, 给评估指标集结带来了问题。因此, 须先将评估指标做无量纲化处理, 常用的方法有归一化处理法、极差法等。

(1) 采用归一化处理法对评估指标进行无量纲化处理。假设评估指标 $x_j (j=1, 2, \dots, m)$ 为极大型评估指标, 观测值记为 $x_{ij} (i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, m)$, 则无量纲化处理数据 x_{ij}^* 为

$$x_{ij}^* = \frac{x_{ij}}{\sum_{i=1}^n x_{ij}} \quad (4-6)$$

(2) 采用极差法对评估指标进行无量纲化处理。若评估指标 $x_j (j=1, 2, \dots, m)$ 为极大型评估指标, 观测值记为 $x_{ij} (i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, m)$, 则无量纲化处理数据 x_{ij}^* 为

$$x_{ij}^* = \frac{x_{ij} - \min_i(x_{ij})}{\max_i(x_{ij}) - \min_i(x_{ij})} \quad (4-7)$$

若评估指标 $x_j (j=1, 2, \dots, m)$ 为极小型评估指标，观测值记为 $x_{ij} (i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, m)$ ，则无量纲化处理数据 x_{ij}^* 为

$$x_{ij}^* = \frac{\max_i(x_{ij}) - x_{ij}}{\max_i(x_{ij}) - \min_i(x_{ij})} \quad (4-8)$$

4.2.4 评估指标赋权

权重是指各评估指标对评估对象影响程度的大小，科学合理地确定评估指标体系中各指标的权重是开展评估工作的关键。指标权重的确定方法直接影响评估体系的科学性和可行性，进而影响最终的评估结果。按照权重确定的原始数据信息特点，常用的权重确定方法可以分为 3 类：主观赋权法、客观赋权法和组合赋权法。指标权重的确定方法应结合具体评估对象、评估指标体系的结构和评估数据的特点进行选择。

为了克服赋权过程中的主观性，可采用灰色群组聚类 and 熵权原理相结合的组合赋权方法，利用灰色关联矩阵对专家进行聚类，再根据判断矩阵的归一化排序向量构成的标准矩阵，运用熵权进行类内赋权，使在群组决策中灰色关联度较高、共识一致、数目较多的类别获得较大权重；在同一类专家中逻辑合理、评估清晰、不确定性小的专家获得较大的权重，从而实现赋权中少数服从多数、精确胜过模糊的原则。

1. 赋权思路

1) 赋权流程

首先，邀请多位专家组成专家群对多个待赋权指标按照一定的评分标准打分，给出评分判断矩阵，计算各专家的排序向量（各专家对于待赋权指标的赋权结果）。其次，运用灰色群组聚类分析理论，将各专家的排序向量转变为专家群灰色关联矩阵，从而对专家进行聚类，将意见相近的专家聚为同一类；依据类容量（类中专家人数多少）计算出专家所在类的类间权重。再次，依据专家的排序向量，运用熵权原理，计算每个专家的熵权，即专家的类内权重。专家的最终权重就等于类间权重与类内权重的乘积。最后，将各专家的权重和与其对应的排序向量进行综合集结，从而确定待评估指标的最终权重结果。评估指标赋权流程如图 4-2 所示。

2) 专家群的选择与构成

为了尽可能减少人为因素对指标赋权结果的影响，针对不同层级的指标赋权，专家群的选择与构成应有所区分。对于一级指标“航空保障装备费用、可靠性和维修性、通用化、综合化、小型化、技术性能”的赋权，一般选择装备发展论证和综合保障工程方面的专家构成评价专家群。

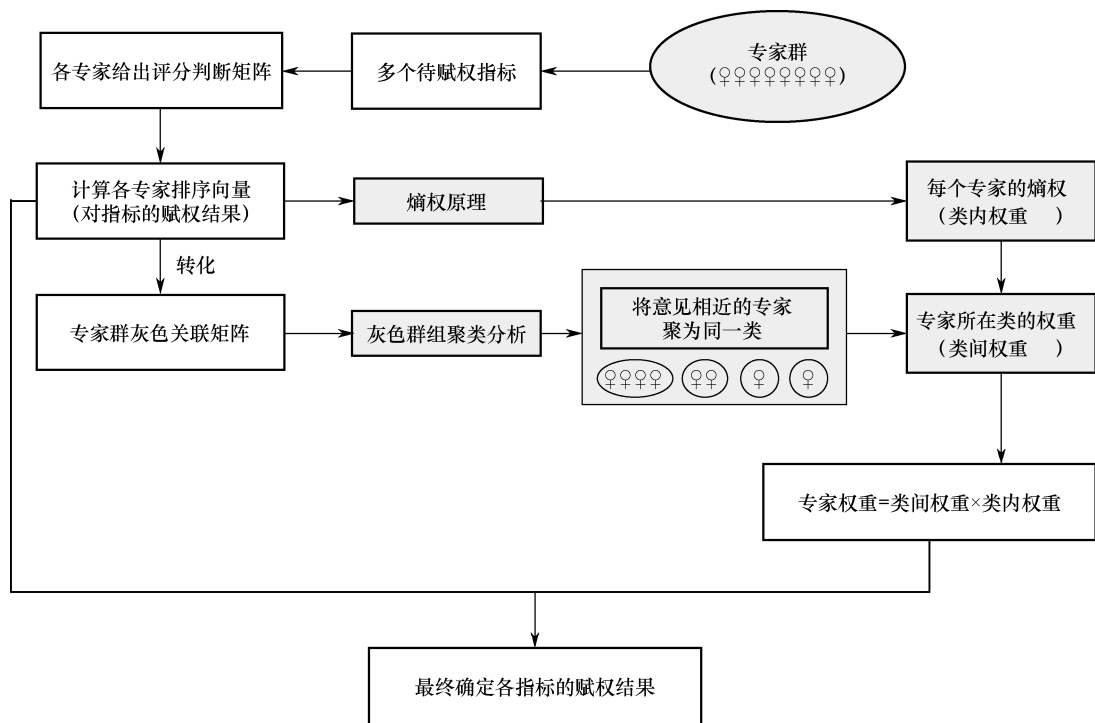


图 4-2 评估指标赋权流程

3) 与传统赋权方法的对比

传统多指标赋权方法一般给予参与赋权的专家相等的权重，没有考虑对专家群中的个体进行区分，对意见相近的专家进行聚类，这样会导致最终的指标赋权结果并未体现专家群中多数意见相近专家的评价意见，不能体现不同专家之间的差异性和重要程度。因此，采用灰色群组聚类分析理论对专家群进行区分，将意见相近的个体聚为同一类，减少孤立意见对整体赋权结果的影响，体现了少数服从多数的原则，有效避免了个别专家主观意愿对赋权结果的影响，提高了专家群赋权的科学性和准确性。

2. 灰色群组聚类

假设某一评估对象集是由 n 个评估指标构成的，在预先给定的评估准则下，由 m 个来自相关领域的专家对这 n 个评估指标进行评价，其评价判断矩阵 A^k 为：

$$A^k = \begin{bmatrix} a_{11}^k & a_{12}^k & \cdots & a_{1n}^k \\ a_{21}^k & a_{22}^k & \cdots & a_{2n}^k \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ a_{n1}^k & a_{n2}^k & \cdots & a_{nn}^k \end{bmatrix} \tag{4-9}$$

式中， a_{ij}^k 为 a_i^k 对 a_j^k 的相对重要程度，可用九标度法确定，如表 4-13 所示。

表 4-13 相对重要程度的比例标度

| 赋值 | 含义 | 赋值 | 含义 |
|------------|------------------------|--------------------|---------------------------|
| 1 | a_i^k 对 a_j^k 同等重要 | | |
| 3 | a_i^k 对 a_j^k 稍微重要 | 1/3 | a_i^k 对 a_j^k 稍微不重要 |
| 5 | a_i^k 对 a_j^k 明显重要 | 1/5 | a_i^k 对 a_j^k 明显不重要 |
| 7 | a_i^k 对 a_j^k 强烈重要 | 1/7 | a_i^k 对 a_j^k 强烈不重要 |
| 9 | a_i^k 对 a_j^k 极端重要 | 1/9 | a_i^k 对 a_j^k 极端不重要 |
| 2, 4, 6, 8 | 介于{1, 3, 5, 7, 9} | 1/2, 1/4, 1/6, 1/8 | 介于{1, 1/3, 1/5, 1/7, 1/9} |

判断矩阵 A^k 中的元素表示两个指标关于评价目标的相对重要程度之比, 这些赋值的根据或来源, 可以由决策者直接提供或由决策者同分析者对话来确定, 或由分析者通过各种技术咨询获得, 或者通过其他合适的途径来酌定。在一般情况下, 判断矩阵应由熟悉问题的专家独立给出。然而, 由于受专家知识水平和个人偏好影响, 完全精确地判断出相对重要程度的取值是不可能的。因此, 必须通过判断矩阵的相容性和误差分析, 保证判断结果的可信度和准确性, 需要进行一致性检验。

一致性指标 CI 和随机一致性比例 CR 为:

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1}, CR = \frac{CI}{RI} \quad (4-10)$$

式中, λ_{\max} 为判断矩阵 A^k 的最大特征值; RI 为平均随机一致性指标, 其值可以查表 4-14。当 $CR < 0.1$ 时, 认为判断矩阵具有可接受的一致性; 否则, 就认为判断矩阵的一致性不符合标准, 评分专家需要重新赋值, 直到一致性检验通过为止。

表 4-14 平均随机一致性指标 RI

| | | | | | | | |
|-----|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| m | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| RI | 0 | 0.5149 | 0.8931 | 1.1185 | 1.2494 | 1.3450 | 1.4200 |
| m | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 |
| RI | 1.4616 | 1.4874 | 1.5156 | 1.5405 | 1.5583 | 1.5779 | 1.5894 |

一致性检验通过后可以将这些判断矩阵进行归一化处理, 得到评估对象的排序向量 $U^k = (u_1^k, u_2^k, \dots, u_n^k)^T$ 为:

$$u_i^k = \frac{w_i^k}{\sum_{i=1}^n w_i^k} \quad (k = 1, 2, \dots, m) \quad (4-11)$$

$$w_i^k = \left(\prod_{j=1}^n a_{ij}^k \right)^{\frac{1}{n}} \quad (4-12)$$

根据专家群中每个专家给出的个人排序向量, 构建专家群的排序矩阵 R 为:

$$\mathbf{R}=[U^1, U^2, \dots, U^m]=\begin{bmatrix} u_1^1 & u_1^2 & \cdots & u_1^m \\ u_2^1 & u_2^2 & \cdots & u_2^m \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ u_n^1 & u_n^2 & \cdots & u_n^m \end{bmatrix} \quad (4-13)$$

对于专家 i 、 j 的排序向量 \mathbf{U}^i 与 \mathbf{U}^j ，灰色关联度 e_{ij} 度量专家给出的判断信息之间的相似程度为：

$$e_{ij} = \frac{1 + |s_i| + |s_j|}{1 + |s_i| + |s_j| + |s_i - s_j|} \quad (4-14)$$

式中，

$$|s_i| = \left| \sum_{k=2}^{n-1} u_k^i + \frac{1}{2} u_n^i \right| \quad (4-15)$$

$$|s_i - s_j| = \left| \sum_{k=2}^{n-1} (u_k^i - u_k^j) + \frac{1}{2} (u_n^i - u_n^j) \right| \quad (4-16)$$

则专家群灰色关联矩阵为：

$$\mathbf{E} = \begin{bmatrix} e_{11} & e_{12} & \cdots & e_{1m} \\ & e_{22} & \cdots & e_{2m} \\ & & \ddots & \vdots \\ & & & e_{mm} \end{bmatrix} \quad (4-17)$$

根据专家群组大小（阈值 θ 越接近 1，则专家群组的分类就越细），选定聚类阈值 $\theta \in [0, 1]$ ，当 $e_{ij} \geq \theta (i \neq j)$ 时，可认为 \mathbf{U}^i 和 \mathbf{U}^j 具有同类判断性质，即认为专家 i 、 j 可聚为同一类。

3. 指标熵权分析

专家群中每位专家的权重由两部分组成。一是类间权重，即通过两两之间的灰色关联矩阵，将意见相近的专家聚为同一类，该类权重主要取决于类容量的大小。类容量较大的，反映了较多专家的意见，其类间权重应较大。二是类内权重，即每位专家自身所在类别中的权重，其权重大小取决于该专家的熵权。

1) 类间权重

若 m 个专家被聚为 t 类，且专家 k 所在类中包含 ϕ_k ($\phi_k \leq m$) 个专家，将 λ_k 记为专家 k 所在类的类间权重，则有：

$$\lambda_k = \frac{\phi_k^2}{\sum_{k=1}^t \phi_k^2} \quad (k=1, 2, \dots, t) \quad (4-18)$$

2) 类内权重

根据专家给出的个人排序向量，其信息熵可表示为：

$$H(k) = -\frac{1}{\ln n} \sum_{i=1}^n u_i^k \ln u_i^k \quad (4-19)$$

信息熵越小，逻辑越清晰，应赋予更大权重。将专家 k 的类内权重记为 α_k ，则有：

$$\alpha_k = \frac{1 - H(k)}{\sum_{k=1}^m [1 - H(k)]} \quad (4-20)$$

则专家 k 的总权重 η_k 为：

$$\eta_k = \lambda_k \cdot \alpha_k \quad (4-21)$$

则 n 个指标权重可表示为：

$$W = \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ \vdots \\ w_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_1^1 & u_1^2 & \cdots & u_1^m \\ u_2^1 & u_2^2 & \cdots & u_2^m \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ u_n^1 & u_n^2 & \cdots & u_n^m \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \eta_1 \\ \eta_2 \\ \vdots \\ \eta_m \end{bmatrix} \quad (4-22)$$

通过上述模型，可求出航空保障装备型谱重要度评估指标体系中一级指标权重 w_i ($i=1, 2, \dots, m$) 和二级指标权重 w_{ij} ($j=1, 2, \dots, n$)。

4.2.5 综合评估

对于多指标综合评估问题，在获取多个指标的评估值后，需要通过一定的数学集结模型或算子，将多个指标的评估值集结成为一个整体的综合评估值，常用的集结模型可分为基于指标性能的集结模型、基于指标值位置或分布的集结模型。其中，基于指标性能的集结模型应用较为广泛。这种集结模型将指标信息与其对应的权重信息进行综合集结，直观明了地将评估原则与指标所要表达的性能或功能内涵融合在一起。本节采用线性加权集结模型，主要优点有：各指标之间相对独立，关联性不强；评估指标之间以线性方式集结补偿；指标权重对综合评估值的影响较其他方法明显；对指标评估值没有特殊要求；计算简单、便于推广。

线性加权集结模型的一般表达式为：

$$y = \sum_{j=1}^n w_j \cdot x_j \quad (4-23)$$

式中， y 为系统的综合评估值； w_i 为第 i 个指标的权重； x_i 为第 i 个指标的评估值。

通过实地调研，收集航空保障装备研制、生产和使用信息后，获取各个二级指标处理后的评估值 T_{ij} ($i=1, 2, \dots, m; j=1, 2, \dots, n$)，采用线性加权集结模型可得航空保障装备型谱重要度排序向量 T ，表示为：

$$T = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n w_i w_{ij} T_{ij} \quad (4-24)$$

型谱重要度综合评估值反映了型谱优先级排序。在型谱重要度评估的基础上可以进行型谱优化方案的初步筛选，筛选原则如下：对于某型航空装备的相同保障功能若同时存在

两型及两型以上的航空保障装备，应选择型谱重要度综合评估值高的、集成综合评估值低的保障装备。

4.3 航空保障装备型谱优化方法

4.3.1 型谱优化数学模型

为简化问题，在不涉及新研航空保障装备的前提下，主要通过现有航空保障装备的综合集成实现航空保障装备型谱优化。所谓综合集成是指在现有航空保障装备型谱系列中选择一种或几种保障装备进行改造升级，在满足原有保障功能的同时替换另外一种或几种保障装备。在型谱优化过程中，既要保留重要度较高的保障装备，同时还要使综合集成费用可控。因此，航空保障装备型谱优化本质上是一类在航空保障装备型谱重要度评估和费用约束的基础上设计航空保障装备综合集成方案问题。

对于由 n 个保障装备构成的航空保障装备集 $E = \{E_1, E_2, \dots, E_n\}$ ，其中 $\forall E_i \in E$ ，其属性如下。

(1) 航空保障装备型谱重要度评估值 T_{E_i} 。

(2) 航空保障装备数量 N_{E_i} ，即该装备的配备数量。

(3) 航空保障装备集成费用矩阵为 $C_E = (C_{E_{ij}})_{n \times n}$ 。其中， $C_{E_{ii}} = 0$ ， $C_{E_{ij}} (1 \leq i, j \leq n)$ 为保障装备 E_i 集成 E_j 的单价费用，包括以下两个部分：一是保障装备 E_i 升级改造费用，二是保障装备 E_i 升级改造后替换 E_j 的费用。根据实际情况，第一部分费用较少，假定忽略不计，第二部分费用以改造升级后 E_i 的采购费用为准，定义为： E_i 的原采购费用 $C_{E_i}^0$ 加上 E_j 的原采购费用 $C_{E_j}^0$ 的 1/2，即 $C_{E_{ij}} = C_{E_i}^0 + \frac{1}{2}C_{E_j}^0$ 。

(4) 航空保障装备型谱优化方案可由矩阵 $M^{E-E} = (m_{ij}^{E-E})_{n \times n}$ 表示。其中， $m_{ij}^{E-E} \in \{0, 1\}$ 。若装备 E_i 集成 E_j ，则 $m_{ij}^{E-E} = 1$ ，且满足 $m_{ji}^{E-E} = 0$ ， m_{ij}^{E-E} 即为该优化问题的决策变量。

因此，优化费用为：

$$C = \text{sum}[(M^{E-E} \cdot C_E)N_E] \quad (4-25)$$

式中， \cdot 表示矩阵点乘；sum 表示向量元素求和。

下面考虑该优化问题的约束条件。

(1) 决策变量取值约束。采用逻辑变量 0 或 1 表示装备是否被集成，即决策变量应满足 $m_{ij}^{E-E} \in \{0, 1\}$ 。

(2) 决策变量逻辑约束。决策变量逻辑约束包括：①装备 E_i 不能被自身集成，即决策变量必须满足 $\sum_{i=1}^n m_{ii}^{E-E} = 0$ ；②装备 E_i 和 E_k 不能同时集成 E_j ，即决策变量必须满足

$\sum_{j=1}^n m_{ij}^{E-E} = 1$ ；③装备 E_i 集成 E_j 和 E_j 集成 E_k 不能同时出现，即决策变量必须满足

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n m_{ij}^{E-E} + m_{jk}^{E-E} \leq 1 \cap \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n m_{ij}^{E-E} + m_{ki}^{E-E} \leq 1。$$

(3) 装备集成数量约束，即决策变量满足 $\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n m_{ij}^{E-E} \geq D$ ， $D \in [1, n]$ 。

(4) 费用约束，即优化费用 $C \leq C_{\max}$ ， C_{\max} 为常数。

航空保障装备型谱优化借鉴效费比最大原理是指优化目标定义为型谱能力指数（效能）与费用比最大化。其中，型谱能力指数是指保留在型谱系列中的航空保障装备重要度评估值之和。

因此，航空保障装备型谱优化数学模型为：

$$\begin{aligned} & \max \frac{\sum_{i=1}^n T_{E_i} - \text{sum}(M^{E-E} T_E)}{\text{sum}[(M^{E-E} \cdot C_E) N_E]} \\ & \text{s.t.} \begin{cases} m_{ij}^{E-E} \in \{0, 1\}, 1 \leq i, j \leq n \\ \sum_{i=1}^n m_{ii}^{E-E} = 0 \\ \sum_{j=1}^n m_{ij}^{E-E} = 1 \\ \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n m_{ij}^{E-E} + m_{jk}^{E-E} \leq 1 \cap \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n m_{ij}^{E-E} + m_{ki}^{E-E} \leq 1 \\ \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n m_{ij}^{E-E} \geq D, D \in [1, n] \\ C \leq C_{\max} \end{cases} \end{aligned} \quad (4-26)$$

由上述数学模型可知，航空保障装备型谱优化是一类典型的 0-1 背包问题。0-1 背包问题属于组合优化问题，包括多个约束条件，是数学中一种经典的 NP 完全问题。

4.3.2 基于多种群遗传算法的型谱优化

0-1 背包问题通常采用传统的精确搜索算法求解，但搜索速度慢而且计算时间较长，目前主要采用群体智能优化算法对背包问题进行求解，如遗传算法、模拟退火算法、粒子群算法等。群体智能优化算法具有较强的搜索能力，而且能进行并行计算，可以获得较为理想的背包问题解，但是还会存在一些不足。以最为常用的遗传算法为例，遗传算法是遵照生物“适者生存、优胜劣汰”的进化原则，不断更新种群近似最优解使其向问题最优解逼近的一类随机搜索算法，具有搜索能力强且不受限于问题具体模型约束等优点，对各类复杂决策优化问题提供了有效支撑。基本遗传算法的操作流程如图 4-3 所示。

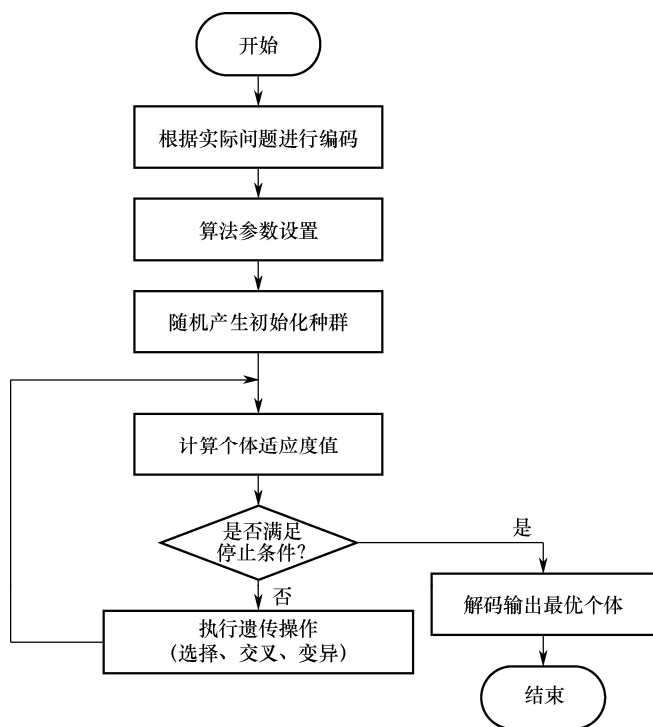


图 4-3 基本遗传算法的操作流程

具体执行过程可以描述如下。

第一步：问题编码。根据实际的待优化问题，选取适合的编码方式对问题决策变量进行编码操作。

第二步：算法参数设置。算法参数包括种群规模、最大迭代次数、交叉/变异概率。

第三步：产生初始化种群。通过随机方法生成进化个体，构成算法初始种群，每个经过编码处理的个体对应待解最优化问题的一个可行解方案。

第四步：计算适应度值。根据最优化问题的决策目标，构建具体的适应度函数，并据此计算出当前进化种群中所有个体的适应度值。

第五步：算法停止条件检验。若满足预先设定的停止条件，则算法终止，并将最优个体解码所得最优解提交系统；否则，进入第六步执行遗传操作。

第六步：执行遗传操作。按照适应度值高者优先保留的准则，在当前种群中用适当方法（如轮盘赌法）选择若干个体作为复制繁殖下一代种群的父代个体，并以预先给定的交叉概率任选两个个体进行交叉操作，产生两个新的子代个体，重复该过程直至所有父代个体交叉完毕；针对父代个体，以预先给定的变异概率任选若干个体进行变异操作，之后，转到第四步。

然而，随着遗传算法的广泛应用及研究的深入，其诸多缺陷与不足也暴露出来，如早熟收敛问题。早熟收敛是遗传算法中不可忽视的问题，主要表现在群体中的所有个体都趋于同一状态而停止进化，算法最终不能给出令人满意的解。

针对遗传算法存在的早熟收敛问题，航空保障装备型谱优化采用多种群遗传算法，其主要优点如下。

(1) 突破传统遗传算法仅靠单个群体进行遗传进化的框架，引入多个种群进行优化搜索；给不同的种群赋予不同的控制参数，实现不同的搜索目的。

(2) 各个种群之间通过移民算子进行联系，实现多种群的协同进化，最优解的获取是多个种群协同进化的综合结果。

(3) 通过人工选择算子保存各种群每个进化代中的最优个体，并作为判断算法收敛的依据。

多种群遗传算法结构如图 4-4 所示。

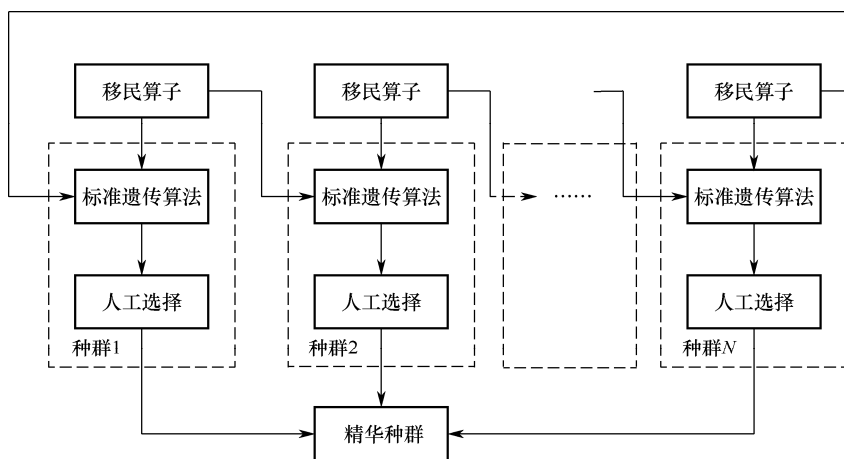


图 4-4 多种群遗传算法结构

本章采用多种群遗传算法进行航空保障装备型谱优化。在寻优过程中，多种群遗传算法对多个种群进行优化搜索，利用移民算子联系各个种群，实现各个种群中最优个体的交换，达到协同进化的目的。多种群遗传算法优化航空保障装备型谱流程如图 4-5 所示。

最优个体是多种群协同进化的结果，解决标准遗传算法早熟收敛问题，算法通过选择合适的编码方式、适应度函数，并采用轮盘赌选择算子、单点交叉算子、离散变异算子实现，具体操作如下。

(1) 编码方式。航空保障装备型谱优化方案矩阵 $\mathbf{M}^{E-E} = (m_{ij}^{E-E})_{n \times n}$ 即为求解对象，直接对矩阵 $\mathbf{M}^{E-E} = (m_{ij}^{E-E})_{n \times n}$ 进行编码，则解的维数 $d = n \times n$ 。

(2) 适应度函数。遗传算法本质上是基于全局搜索机制，对适应度函数求极值的过程。适应度函数确定了个体在种群中的优劣性，决定了个体在进化过程中遗传下去的概率。航空保障装备型谱优化采用费用作为评价标准，即

$$\text{fitness} = \frac{\sum_{i=1}^n T_{E_i} - \text{sum}(\mathbf{M}^{E-E} \mathbf{T}_E)}{\text{sum}[(\mathbf{M}^{E-E} \cdot \mathbf{C}_E) N_E]} \quad (4-27)$$

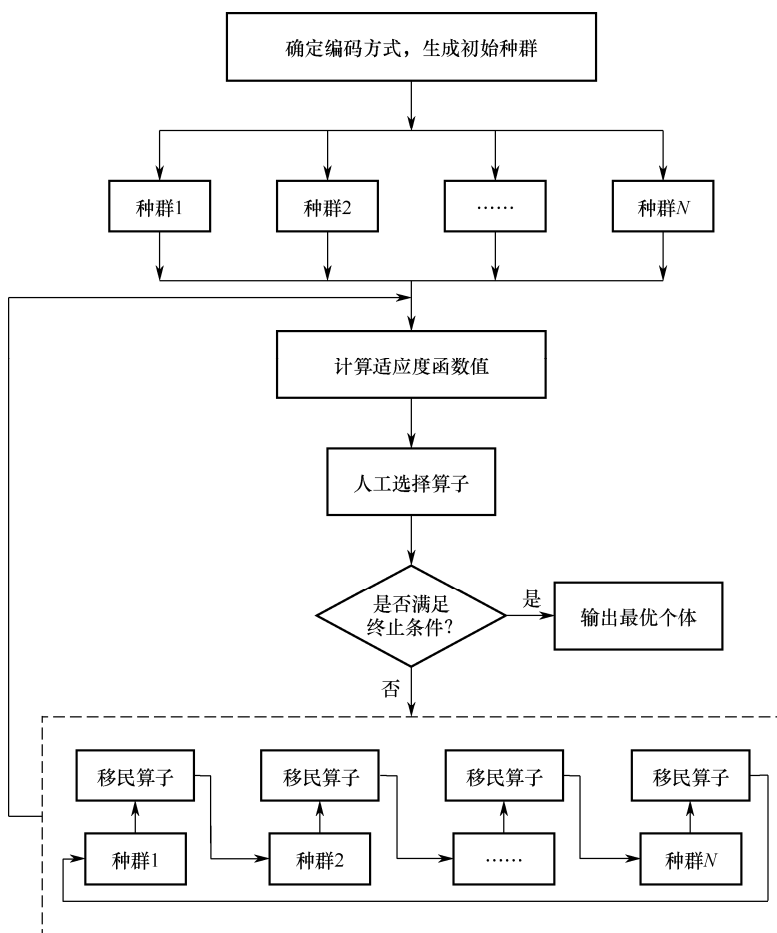


图 4-5 多种群遗传算法优化航空保障装备型谱流程

(3) 多种群遗传算法操作。通过多种群遗传算法操作，生成新一代种群。多种群遗传算法操作既包括常规遗传算法的选择、变异、交叉操作，又包括多种群遗传算法特有的移民操作和人工选择操作。选择操作充分体现了遗传算法优胜劣汰的进化思想，采用遗传算法最常用的轮盘赌选择算子，根据个体适应度在整个种群中的比例确定个体被选择的概率。交叉操作是产生新个体的主要方法，能够改善种群平均适应性能，是遗传操作全局搜索能力的主要决定因素，因此选择单点交叉算子，交叉概率取值为 0.7~0.9 的随机值；新个体产生的辅助手段是变异操作，是遗传算法局部搜索能力的决定因素，因此选择离散变异算子，变异概率取值为 0.005~0.01 的随机值。移民操作和人工选择操作是多种群遗传算法特有的，通过移民操作实现种群之间的交流，达到协同进化的目的；人工选择操作则是为了避免交叉、变异操作破坏种群中的优秀个体，将进化过程中的优秀个体保存下来，并作为终止条件。

(4) 终止条件。常规遗传算法采用的终止判断条件一般为进化代数，但是在实际使用中可能由于进化代数设置不当，造成航空保障装备型谱优化方案没有进化到最优解。因此，终止条件选用系统最优个体保持代数，使得遗传算法知识积累的能力得到充分发挥，确保航空保障装备型谱优化方案进化到最优解。

4.4 航空保障装备型谱优化案例

4.4.1 案例背景

目前，×类航空保障装备型号较多，如配备数量较多的主要有 A 型和 C 型；配备时间较早的有 B 型和 D 型，其性能较落后，功能较简单；而近 10 年配备的主要有 A 型、C 型和 E 型，其系统配置较高；近 5 年配备的主要有 F 型、G 型和 H 型，但均属于专用型，通用性较差。总的来说，×类航空保障装备存在相互不通用、技术状态参差不齐、产品标准化程度低等问题，给保障装备使用、维护、保障及设备管理带来很大不便，影响了保障装备效能的充分发挥。因此，需要通过梳理×类航空保障装备现状，根据使用和发展需求，制订×类航空保障装备型谱优化方案，从而有效规范研制和生产，促进×类航空保障装备实现通用化、标准化。

通过对×类航空保障装备设计研究所、生产企业、使用单位和修理企业进行实地调研，将收集的企业研制、生产和使用信息进行统计与分析，采用基于灰色系统理论的赋权模型与熵权、指标线性加权集结模型，对型谱重要度评估指标信息进行综合集结，得到×类航空保障装备型谱重要度评估值；通过构建型谱效能与费用比模型，进行×类航空保障装备型谱优化案例实证研究，为航空保障装备型谱优化与论证提供借鉴。

4.4.2 型谱重要度评估

×类航空保障装备型谱重要度评估指标信息如表 4-15 所示。其中，装备重量和体积两个评估指标，按重量和体积所在区间分为 3 档次：第一档计 5、第二档计 3、第三档计 1。

表 4-15 ×类航空保障装备型谱重要度评估指标信息

| 一级指标 | 二级指标 | A 型 | B 型 | C 型 | D 型 | E 型 | F 型 | G 型 | H 型 |
|-------------|-------------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 保障装备费用 | 采购费用（万元） | 22 | 12 | 8.4 | 25 | 25 | 73 | 22.5 | 22.5 |
| | 修理费用（万元） | 3 | 3 | 3 | 3 | 6 | 1.5 | 6 | 4 |
| 保障装备可靠性和维修性 | 使用寿命（h） | 3650 | 1825 | 1825 | 1825 | 2920 | 1825 | 3650 | 3650 |
| | 平均故障间隔时间（h） | 1000 | 500 | 500 | 500 | 800 | 1200 | 1500 | 1500 |
| | 平均修复时间（h） | 48 | 72 | 72 | 72 | 120 | 72 | 120 | 120 |
| 保障装备通用化 | 装备配备数（台） | 71 | 3 | 15 | 4 | 2 | 1 | 4 | 4 |
| | 机型适用数（个） | 25 | 1 | 6 | 2 | 3 | 1 | 1 | 1 |
| 保障装备综合化 | 主要功能数（个） | 4 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 |
| | 货架产品使用程度 | 80 | 65 | 62 | 64 | 70 | 90 | 85 | 86 |

(续表)

| 一级指标 | 二级指标 | A 型 | B 型 | C 型 | D 型 | E 型 | F 型 | G 型 | H 型 |
|----------|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 保障装备小型化 | 重量 | 5 | 1 | 5 | 3 | 5 | 5 | 5 | 5 |
| | 体积 | 5 | 1 | 5 | 5 | 3 | 5 | 5 | 5 |
| 保障装备技术性能 | 硬件性能 | 80 | 70 | 72 | 69 | 90 | 95 | 92 | 93 |
| | 软件性能 | 75 | 85 | 72 | 83 | 80 | 93 | 87 | 91 |

评估指标由于量纲、数量级的不同会对评估结果造成不同的影响，因此首先采用极差法对原始数据进行无量纲化处理，得到如表 4-16 所示结果。

表 4-16 ×类航空保障装备型谱重要度评估指标信息无量纲化

| 一级指标 | 二级指标 | A 型 | B 型 | C 型 | D 型 | E 型 | F 型 | G 型 | H 型 |
|-------------|----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 保障装备费用 | 采购费用 | 0.7895 | 0.9443 | 1.0000 | 0.7430 | 0.7430 | 0.0000 | 0.7817 | 0.7817 |
| | 修理费用 | 0.6667 | 0.6667 | 0.6667 | 0.6667 | 0.0000 | 1.0000 | 0.0000 | 0.4444 |
| 保障装备可靠性和维修性 | 使用寿命 | 1.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.6000 | 0.0000 | 1.0000 | 1.0000 |
| | 平均故障间隔时间 | 0.5000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.3000 | 0.7000 | 1.0000 | 1.0000 |
| | 平均修复时间 | 1.0000 | 0.6667 | 0.6667 | 0.6667 | 0.0000 | 0.6667 | 0.0000 | 0.0000 |
| 保障装备通用化 | 装备配备数 | 1.0000 | 0.0286 | 0.2000 | 0.0429 | 0.0143 | 0.0000 | 0.0429 | 0.0429 |
| | 机型适用数 | 1.0000 | 0.0000 | 0.2083 | 0.0417 | 0.0833 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 |
| 保障装备综合化 | 主要功能数 | 1.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 |
| | 货架产品使用程度 | 0.6429 | 0.1071 | 0.0000 | 0.0714 | 0.2857 | 1.0000 | 0.8214 | 0.8571 |
| 保障装备小型化 | 重量 | 1.0000 | 0.0000 | 1.0000 | 0.5000 | 1.0000 | 1.0000 | 1.0000 | 1.0000 |
| | 体积 | 1.0000 | 0.0000 | 1.0000 | 1.0000 | 0.5000 | 1.0000 | 1.0000 | 1.0000 |
| 保障装备技术性能 | 硬件性能 | 0.4231 | 0.0385 | 0.1154 | 0.0000 | 0.8077 | 1.0000 | 0.8846 | 0.9231 |
| | 软件性能 | 0.1429 | 0.6190 | 0.0000 | 0.5238 | 0.3810 | 1.0000 | 0.7143 | 0.9048 |

采用基于灰色群组聚类和熵权原理相结合的组合赋权方法进行赋权分析，根据型谱重要度评估工作要求，邀请 6 位装备发展论证和综合保障工程领域的专家组成专家决策群，按照一定评估原则，采用层次分析法的九标度准则，对×类航空保障装备型谱重要度评估指标体系中保障装备费用、保障装备可靠性和维修性、保障装备通用化、保障装备综合化、保障装备小型化、保障装备技术性能这 6 个一级指标权重进行评价打分。各专家给出的判断矩阵如下：

$$A_1 = \begin{bmatrix} 1 & 7 & 5 & 4 & 3 & 5 \\ 1/7 & 1 & 1 & 1/2 & 1 & 3 \\ 1/5 & 1 & 1 & 1/3 & 1/2 & 1 \\ 1/4 & 2 & 3 & 1 & 1/3 & 1 \\ 1/3 & 1 & 2 & 3 & 1 & 2 \\ 1/5 & 1/3 & 1 & 1 & 1/2 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A_2 = \begin{bmatrix} 1 & 6 & 7 & 5 & 4 & 2 \\ 1/6 & 1 & 1 & 1 & 2 & 1/2 \\ 1/7 & 1 & 1 & 1/2 & 1/2 & 2 \\ 1/5 & 1 & 2 & 1 & 1 & 1 \\ 1/4 & 1/2 & 2 & 1 & 1 & 1 \\ 1/2 & 2 & 1/2 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A_3 = \begin{bmatrix} 1 & 6 & 8 & 4 & 5 & 2 \\ 1/6 & 1 & 1 & 1/2 & 1/3 & 1 \\ 1/8 & 1 & 1 & 1/3 & 1 & 1/3 \\ 1/4 & 2 & 3 & 1 & 1 & 2 \\ 1/5 & 3 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1/2 & 1 & 3 & 1/2 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A_4 = \begin{bmatrix} 1 & 3 & 2 & 5 & 4 & 3 \\ 1/3 & 1 & 1 & 1 & 2 & 1 \\ 1/2 & 1 & 1 & 2 & 3 & 3 \\ 1/5 & 1 & 1/2 & 1 & 2 & 3 \\ 1/4 & 1/2 & 1/3 & 1/2 & 1 & 2 \\ 1/3 & 1 & 1/3 & 1/3 & 1/2 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A_5 = \begin{bmatrix} 1 & 5 & 7 & 3 & 4 & 3 \\ 1/5 & 1 & 1 & 1/2 & 1 & 1/3 \\ 1/7 & 1 & 1 & 1 & 3 & 1/2 \\ 1/3 & 2 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1/4 & 1 & 1/3 & 1 & 1 & 1 \\ 1/3 & 3 & 2 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A_6 = \begin{bmatrix} 1 & 5 & 8 & 6 & 3 & 2 \\ 1/5 & 1 & 1 & 1 & 1/2 & 1/3 \\ 1/8 & 1 & 1 & 2 & 1 & 1/2 \\ 1/6 & 1 & 1/2 & 1 & 1 & 1 \\ 1/3 & 2 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1/2 & 3 & 2 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

计算 6 名专家给出的判断矩阵的最大特征值 λ_{\max} 、一致性指标 CI 和随机一致性比例 CR，得到一致性检验结果如表 4-17 所示。

表 4-17 一致性检验结果

| 矩阵 参数 | A_1 | A_2 | A_3 | A_4 | A_5 | A_6 |
|------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| λ_{\max} | 6.4817 | 6.5283 | 6.3663 | 6.3379 | 6.3781 | 6.2981 |
| CI | 0.0963 | 0.1057 | 0.0733 | 0.0676 | 0.0756 | 0.0596 |
| CR | 0.0771 | 0.0846 | 0.0587 | 0.0541 | 0.0605 | 0.0477 |

由表 4-17 结果可知，随机一致性比例均满足 $CR < 0.1$ ，因此，6 名专家给出的判断矩阵具有可接受的一致性，通过一致性检验。

由专家群个人排序向量构成的矩阵 R 为：

$$R = \begin{bmatrix} 0.4685 & 0.4674 & 0.4615 & 0.3775 & 0.4474 & 0.4522 \\ 0.1013 & 0.1006 & 0.0720 & 0.1323 & 0.0772 & 0.0763 \\ 0.0743 & 0.0873 & 0.0642 & 0.2041 & 0.1053 & 0.0952 \\ 0.1166 & 0.1164 & 0.1572 & 0.1300 & 0.1272 & 0.0889 \\ 0.1650 & 0.1076 & 0.1202 & 0.0833 & 0.0900 & 0.1258 \\ 0.0743 & 0.1208 & 0.1248 & 0.0728 & 0.1528 & 0.1616 \end{bmatrix}$$

各专家之间的灰色关联矩阵 E 为：

$$E = \begin{bmatrix} 1.0000 & 0.9905 & 0.9879 & 0.9339 & 0.9886 & 0.9706 \\ & 1.0000 & 0.9973 & 0.9256 & 0.9980 & 0.9797 \\ & & 1.0000 & 0.9233 & 0.9993 & 0.9823 \\ & & & 1.0000 & 0.9239 & 0.9084 \\ & & & & 1.0000 & 0.9816 \\ & & & & & 1.0000 \end{bmatrix}$$

由 E 可知，经试探性取值，发现阈值 $\theta=0.99$ 较为合适。此时，聚类结果为：专家 1、2、3、5 聚为一类，而专家 4 和专家 6 各自成一类，即 $\{(1, 2, 3, 5), (4), (6)\}$ ，则类间权重为：

$$\lambda_1 = \frac{16}{18}, \lambda_2 = \frac{1}{18}, \lambda_3 = \frac{1}{18}$$

根据专家群中各专家给出的个人排序向量，可计算专家群组的熵向量 H 为：

$$H = (0.1078, 0.1425, 0.1449, 0.1065, 0.1602, 0.1644)$$

对于第 1 类中的专家权重，根据熵权原理，可计算出类内权重分别为：

$$\alpha_{11} = 0.2590, \alpha_{12} = 0.2489, \alpha_{13} = 0.2482, \alpha_{15} = 0.2438$$

对于第 2、3 类中的专家，因其类中只有一个专家，则类内权重为：

$$\alpha_{24} = \alpha_{36} = 1$$

根据以上结果，可以得到群组专家总的权重向量 W 为：

$$W = (0.2302, 0.2213, 0.2207, 0.0556, 0.2167, 0.0556)$$

综合 6 位专家的总权重和排序向量，可得 \times 类航空保障装备型谱重要度评估中的保障装备费用、可靠性和维修性、通用化、综合化、小型化、技术性能这 6 个一级指标的权重分别为 0.4562、0.0898、0.0900、0.1270、0.1194、0.1176。

二级指标权重可采用同样的方法求出，但由于在 \times 类航空保障装备型谱重要度评估中二级指标个数较少，因此由专家直接给出二级指标权重。各二级指标的权重乘以其对应的上一级指标的权重即可得出该二级指标的总权重。 \times 类航空保障装备型谱重要度评估指标赋权结果如表 4-18 所示。

表 4-18 \times 类航空保障装备型谱重要度评估指标赋权结果

| 一级指标 | 一级指标权重 | 二级指标 | 二级指标权重 | 总权重 |
|-------------|--------|----------|--------|--------|
| 保障装备费用 | 0.4562 | 采购费用 | 0.6 | 0.2737 |
| | | 修理费用 | 0.4 | 0.1825 |
| 保障装备可靠性和维修性 | 0.0898 | 使用寿命 | 0.5 | 0.0449 |
| | | 平均故障间隔时间 | 0.3 | 0.0269 |
| | | 平均修复时间 | 0.2 | 0.0180 |
| 保障装备通用化 | 0.0900 | 装备配备数 | 0.4 | 0.0360 |
| | | 机型适用数 | 0.6 | 0.0540 |
| 保障装备综合化 | 0.1270 | 主要功能数 | 0.3 | 0.0381 |
| | | 货架产品使用度 | 0.7 | 0.0889 |
| 保障装备小型化 | 0.1194 | 重量 | 0.6 | 0.0716 |
| | | 体积 | 0.4 | 0.0478 |
| 保障装备技术性能 | 0.1176 | 硬件性能 | 0.5 | 0.0588 |
| | | 软件性能 | 0.5 | 0.0588 |

采用线性加权集结模型，对经过处理的指标评估值及与其对应的权重进行综合集结，可得×类航空保障装备型谱重要度评估结果，如表 4-19 所示。

表 4-19 ×类航空保障装备型谱重要度评估结果

| 一级指标 | 二级指标 | 总权重 | A 型 | B 型 | C 型 | D 型 | E 型 | F 型 | G 型 | H 型 |
|-------------|-------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 保障装备费用 | 采购费用（万元） | 0.2737 | 0.2161 | 0.2585 | 0.2737 | 0.2034 | 0.2034 | 0.0000 | 0.2140 | 0.2140 |
| | 修理费用（万元） | 0.1825 | 0.1217 | 0.1217 | 0.1217 | 0.1217 | 0.0000 | 0.1825 | 0.0000 | 0.0811 |
| 保障装备可靠性和维修性 | 使用寿命（h） | 0.0449 | 0.0449 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0269 | 0.0000 | 0.0449 | 0.0449 |
| | 平均故障间隔时间（h） | 0.0269 | 0.0135 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0081 | 0.0189 | 0.0269 | 0.0269 |
| | 平均修复时间（h） | 0.0180 | 0.0180 | 0.0120 | 0.0120 | 0.0120 | 0.0000 | 0.0120 | 0.0000 | 0.0000 |
| 保障装备通用化 | 装备配备数（台） | 0.0360 | 0.0360 | 0.0010 | 0.0072 | 0.0015 | 0.0005 | 0.0000 | 0.0015 | 0.0015 |
| | 机型适用数（个） | 0.0540 | 0.0540 | 0.0000 | 0.0113 | 0.0023 | 0.0045 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 |
| 保障装备综合化 | 主要功能数（个） | 0.0381 | 0.0381 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 |
| | 货架产品使用程度 | 0.0889 | 0.0572 | 0.0095 | 0.0000 | 0.0064 | 0.0254 | 0.0889 | 0.0730 | 0.0762 |
| 保障装备小型化 | 重量 | 0.0716 | 0.0716 | 0.0000 | 0.0716 | 0.0358 | 0.0716 | 0.0716 | 0.0716 | 0.0716 |
| | 体积 | 0.0478 | 0.0478 | 0.0000 | 0.0478 | 0.0478 | 0.0239 | 0.0478 | 0.0478 | 0.0478 |
| 保障装备技术性能 | 硬件性能 | 0.0588 | 0.0249 | 0.0023 | 0.0068 | 0.0000 | 0.0475 | 0.0588 | 0.0520 | 0.0543 |
| | 软件性能 | 0.0588 | 0.0084 | 0.0364 | 0.0000 | 0.0308 | 0.0224 | 0.0588 | 0.0420 | 0.0532 |
| 重要度评估值 | | — | 0.7520 | 0.4413 | 0.5520 | 0.4615 | 0.4342 | 0.5392 | 0.5738 | 0.6715 |

4.4.3 型谱优化分析

采用多种群遗传算法进行优化仿真，参数设置如下：个体数目为 40，种群数为 10，最优个体保持代数为 10，代沟为 0.9，交叉概率为[0.7, 0.9]，变异概率为[0.005, 0.01]。航空保障装备集成数量 $D=5$ 个，最大集成费用为 $C_{\max} = 500$ 万元。

利用多种群遗传算法进行×类保障装备型谱设计方案优化，优化方案即优化矩阵 M^{E-E} 如下。

$$M^{E-E} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

由优化矩阵 M^{E-E} 可知×类航空保障装备型谱优化方案为：A 型保障装备升级集成 B

型、D 型和 G 型装备；C 型保障装备升级集成 E 型和 F 型设备；保留 H 型保障装备。该优化方案与专家反复研讨的结果具有较强的一致性，表明方法的可行性。

该优化方案的最优解为 9.2534×10^{-3} ，优化费用为 441.7 万元，最优解变化过程如图 4-6 所示。

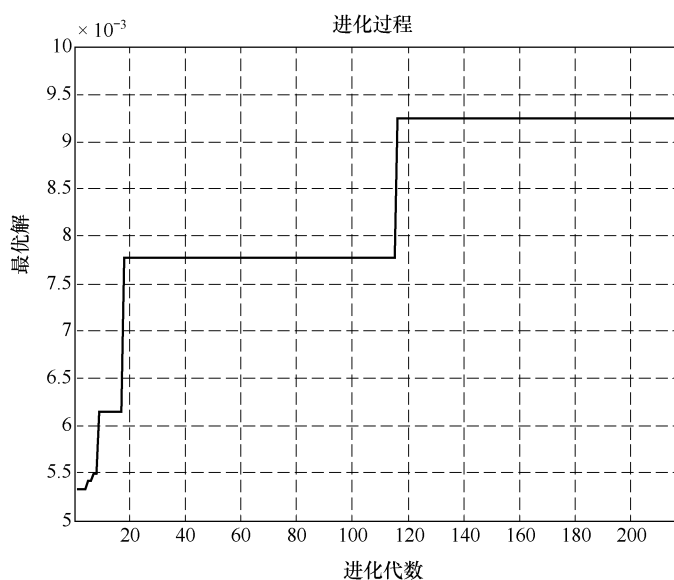


图 4-6 最优解变化过程

航空保障装备数量配置

航空保障装备数量的科学、精确、有效配置，是以最小的资源消耗实现航空装备最大作战保障能力的重要前提。在对航空保障装备数量配置影响因素进行系统分析的基础上，区分航空保障装备不同寿命周期阶段、不同职能管理层级，建立了航空保障装备数量配置的一般流程；然后在系统分析类比法、估算法、排队论法、仿真优化法、综合优化法，确定航空保障装备数量配置的原理、典型案例、使用条件、优缺点、适用范围的基础上，构建了航空保障装备数量配置方法选择的逻辑决断图，从而为实现航空保障装备数量的精确配置奠定了基础。

5.1 航空保障装备数量配置影响因素分析

航空保障装备数量配置是一个复杂的系统工程，涉及多种因素的共同作用和相互影响，主要包括作战训练任务因素、航空装备因素、维修保障因素，以及航空保障装备特性因素、费用及管理因素等，如图 5-1 所示。

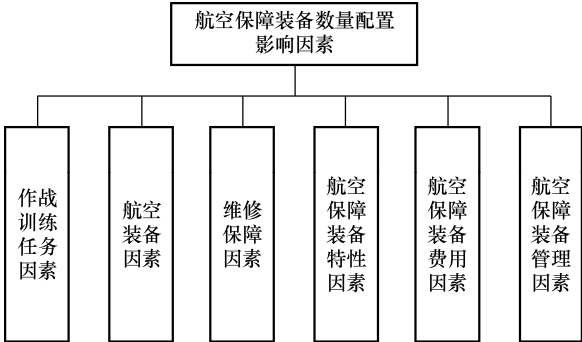


图 5-1 航空保障装备数量配置的影响因素

5.1.1 作战训练任务因素

航空装备作战训练任务是产生航空保障装备配置需求的根本。航空装备作战训练任务

因素主要表现在任务类型、任务强度、任务保障要求等方面。

(1) 任务类型。执行不同的任务类型，航空机载设备、重要系统的使用情况也不尽相同，从而对地面航空保障装备的需求也有所不同。例如，军用飞机执行挂弹警戒巡航任务，军械专业保障任务加重，导弹运挂车辆、导弹检测设备 etc 需求显著增加。

(2) 任务强度。航空装备的任务强度主要表现为执行任务过程中的飞行时间和起落次数。任务强度越大意味着飞行时间越长或者起落次数越多，理论上的保障需求增加，需要更多数量的航空保障装备。

(3) 任务保障要求。航空装备的任务保障要求主要表现为战备完好性要求、机动性要求和多机种（型）保障要求等。一是作战单元高战备完好性要求，需要配置较多数量的航空保障装备，以提高装备完好率；二是作战单元高机动性要求，需要配置（携行）较少数量的航空保障装备，以缩减保障规模、提升保障机动性；三是多机种保障要求，需要同时考虑不同类型飞机保障装备需求，并加以综合权衡确定，以适应多兵机种联合作战要求。

5.1.2 航空装备因素

航空保障装备作为航空装备（主装备）的配套装备，其数量配置直接受航空装备自身相关因素的影响，主要表现在航空装备可靠性、维修性、保障性、设计构型和配置数量等方面。

(1) 航空装备可靠性。就日常装备保障工作而言，航空装备可靠性水平越高，意味着在一定条件下航空装备故障发生的频率、次数越少，需要的航空保障装备数量相应减少。另外，还要考虑环境因素对航空装备可靠性的影响。例如，军用飞机在高寒地区和湿热地区执行作战训练任务，其部分机载设备、部附件的可靠性明显不同，进而影响所需航空保障装备数量的配置。

(2) 航空装备维修性。就日常装备保障工作而言，航空装备维修性水平越高，意味着在一定条件下航空装备维修时间相对越短，占用航空保障装备的时间也会明显减少，提升了航空保障装备的周转速度，从而减少了对航空保障装备数量的配置需求。

(3) 航空装备保障性。就日常装备保障工作而言，航空装备保障性水平越高，意味着在一定条件下航空装备对航空保障装备等资源的需求就越少。例如，新型飞机自保障设计和自主保障信息系统的运用，大大降低了对地面航空保障装备的依赖，减少了对电源车、空调车、充氧车、地面检测设备 etc 传统保障装备的需求。

(4) 航空装备设计构型。新型航空装备的设计生产将广泛采用新材料、新技术、新理念，使航空装备机体、重要系统的设计构型发生显著变化，从而影响航空保障装备数量的配置。例如，新型飞机在设计时，提出了对隐身结构和隐身材料的需求，为此需要增加低可探测性维护设备的配置；新型飞机要求外场故障隔离定位到外场可更换单元（LRU）和

外场可更换模块(LRM),从而对便携式维修辅助工具(PMA)、综合化自动检测设备(IATE)等保障装备提出了需求。

(5) 航空装备配置数量。作战单元航空装备配置数量直接影响保障装备的配置数量。在一般情况下,作战单元航空装备配置数量与保障装备配置数量成正比。

5.1.3 维修保障因素

维修保障工作是航空保障装备现实使用情况的直接反映,是影响航空保障装备数量配置的重要因素,主要包括维修体制、维修保障模式、维修保障需求等方面。

(1) 维修体制。在传统上航空装备以三级维修为主,各个维修级别都需要配置一定品种和数量的航空保障装备,以满足相应级别预设的保障任务。新型战机由于具备较高的可靠性、维修性和保障性,将普遍采用二级维修体制,即取消中继级维修,拓展基层级和基地级维修工作职能。这种能力上的变化必将对基层级维修所需的航空保障装备数量配置提出新的、更高的要求。

(2) 维修保障模式。随着新技术、新工艺、新材料在新型航空装备研制过程中的广泛应用,航空装备维修保障军民融合式发展已经成为必然趋势。在传统上,航空装备维修保障模式主要以军方独立保障为主,在配置航空保障装备时只须考虑其与军方建制保障力量是否相适应。在新的军民融合维修保障模式中,引入包括装备承制方在内的工业部门保障力量,将会改变传统航空保障装备配置的理念和思路。例如,工业部门在型号研制初期主动统筹考虑航空保障装备配置、“三化”问题;使用单位执行大项演训任务时,由工业部门负责部分航空保障装备的筹措、供应、保障等。

(3) 维修保障需求。维修保障需求主要取决于维修保障任务要求,而维修保障任务要求又是通过详细、具体的维修保障方案实现的。航空装备的日常维护、定检、周期性工作等维修保障任务,都对应有明确的维修保障方案,并列入规范性文件强制执行。维修保障方案规定的预防性维修工作项目的多少决定了航空保障装备数量的需求,修复性维修工作操作实施的过程也决定了航空保障装备数量的需求。

5.1.4 航空保障装备特性因素

航空保障装备自身的相关特性,也会直接影响其数量的配置。主要表现在航空保障装备的可靠性、维修性等质量特性,以及航空保障装备综合化、通用化、小型化等设计特性。

(1) 航空保障装备可靠性。同航空装备可靠性类似,如果航空保障装备自身可靠性水平较高,则故障少、寿命长,其配置数量应适当减少。

(2) 航空保障装备维修性。同航空装备维修性类似,航空保障装备自身维修性水平越高,则航空保障装备的可用性就越高,其配置数量应适当减少。

(3) 航空保障装备综合化。航空保障装备综合化主要是指运用系统工程的思维和方法,

将与保障装备有关的新工艺、新技术和新方法等有机融合,实现一型航空保障装备同时具备检测、诊断、维修等多项功能或覆盖多个系统保障功能的过程。因此,航空保障装备综合化水平高,功能集成多,其配置数量则相应减少。

(4) 航空保障装备通用化。航空保障装备通用化主要是指一型航空保障装备能够满足两种(含)以上型号航空装备的保障需求。因此,航空保障装备通用化水平较高,则多机种保障时,其配置数量相应减少。

(5) 航空保障装备小型化。航空保障装备小型化主要是指航空保障装备在满足基本功能的前提下,具有体积小、重量轻的特点,有助于提高作战单元快速机动保障能力。因此,航空保障装备小型化水平高,则在满足一定机动保障要求约束下,其配置数量可以适当增加。

5.1.5 航空保障装备费用因素

航空保障装备费用,主要包括采购费用和使用保障费用,是影响航空保障装备数量配置决策非常直接、客观的因素之一。

(1) 采购费用。航空保障装备采购费用过高,使用部门会考虑由相近功能且较低成本的航空保障装备代替或减少其配置数量。

(2) 使用保障费用。一般而言,航空保障装备使用保障费用与采购费用成正比。当航空保障装备使用保障费用较高时,如果其可靠性水平也高,则可以在经费允许范围内正常配置;反之,则减少其配置数量。

5.1.6 航空保障装备管理因素

航空保障装备的日常使用,受到使用单位装备管理要求的影响,主要表现在航空保障装备管理模式、航空保障装备预置方式和航空保障装备修理方式等方面。

(1) 航空保障装备管理模式。航空保障装备在使用单位的管理模式包括集中或分散管理模式、基于信息系统的管理模式等。相比传统缺乏信息系统支撑的航空保障装备分散管理模式,信息化条件下的集中统管,能最大程度发挥资源集中共享的优势,确保航空保障装备的完好状态处于较高水平,减少保障延误时间,从而降低作战单元航空保障装备的配置数量。

(2) 航空保障装备预置方式。作战单元经常需要通过机动转场的方式执行作战训练任务,如果前推机场预置有一定数量的航空保障装备,则需要携行的保障装备数量相应减少,能够缩小伴随保障规模;反之,则需要携行较多数量的保障装备,才能满足任务需求。

(3) 航空保障装备修理方式。如果航空保障装备的修理工作在一线修理厂就能完成,则修理时间、延误时间等就会相对较短,配置数量可以适当减少;如果航空保障装备修理工作由于备件筹措、修理工艺要求等原因,只能由后方修理机构完成,则修理时间、延误时间等就会相对较长,作战单元就需要配置更多的航空保障装备以满足任务需求。

5.1.7 影响因素的因果关系图分析

通过上述分析可以看出，航空保障装备数量配置是一个受多因素影响的复杂问题。为了更加直观地体现出上述各因素对航空保障装备数量配置的影响，借鉴因果关系图对其进行描述。因果关系图，又称鱼刺图、特性要因图、树枝图等，其原理是把可能引起某一事件发生的直接因素和间接因素通过逻辑推理的方法，按照不同层次进行排列，从而使复杂的原因系统化、条理化，从中发现引起最终事件发生的主要原因，是一种透过现象看本质的分析方法。

在明确上述影响因素的基础上，通过系统的调查研究和逻辑推理分析，绘制影响航空保障装备数量配置因素的因果关系，如图 5-2 所示。

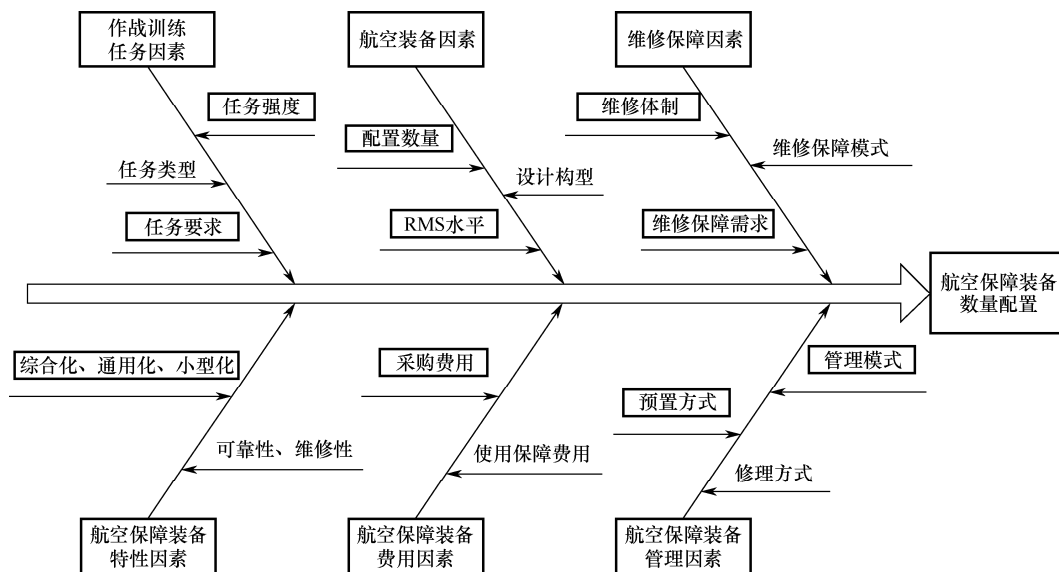


图 5-2 影响航空保障装备数量配置因素的因果关系

从图 5-2 可以看出，航空装备作战训练任务强度、任务要求，航空装备（主装备）配置数量、RMS 水平，航空保障装备维修体制、维修保障需求，航空保障装备综合化、通用化、小型化水平，航空保障装备采购费用，以及航空保障装备管理模式、预置方式等是影响航空保障装备数量配置的关键因素。在航空保障装备数量配置计划的制订、改进、优化过程中，上述关键因素应是决策者关注的重点，需要深入分析和有效控制，以提高航空保障装备数量配置的科学性和实用性。

5.2 航空保障装备数量配置的一般流程

按照航空保障装备的不同寿命周期阶段，区分不同职能管理层级，建立航空保障装备

数量配置的一般流程。

5.2.1 初始阶段配置流程

初始阶段航空保障装备数量配置主要解决初始作战保障能力形成的问题，重点在于保证航空保障装备基本够用。为便于分析和说明，将航空保障装备初始阶段数量配置流程细化为立项论证、研制生产和交付使用 3 个阶段，各阶段具体流程分别如图 5-3～图 5-5 所示。

立项论证阶段（见图 5-3），主要由上级业务机关负责，主要工作输出是“初步确认航空保障装备需求清单”。具体步骤为：一是上级业务机关组织航空装备型号总师单位提出航空保障装备需求目录清单，包括型别、性能、途径（货架、沿用、改进和新研）、专通用情况、目标价格、体积、重量、“三化”要求、鉴定定型级别、管理代码等要素；二是上级业务机关组织相关科研院所、航空保障装备使用单位等，联合会审航空保障装备需求清单；三是初步确认航空保障装备需求清单，如前一阶段会审未通过，应组织航空装备型号总师单位重新提出需求清单，并再次进行多方会审，直至需求清单通过。

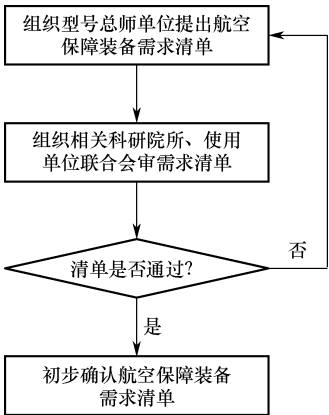


图 5-3 立项论证阶段航空保障装备数量配置流程

研制生产阶段（见图 5-4），主要由上级业务机关负责，主要工作输出是“向使用单位下发航空保障装备需求清单”。具体步骤为：一是上级业务机关按照批准的航空保障装备需求清单，吸收军内外单位参加，通过竞争方式确定分工定点，组织开展航空保障装备研制；二是分别组织承试单位和使用单位，开展航空保障装备试验和试用工作，试验、试用评估意见由承试单位和使用单位独立出具，作为定型鉴定的依据；三是上级业务机关组织航空装备型号总师单位上报航空保障装备拟交付清单建议（区分一线、二线）；四是业务机关组织拟交付清单（含承制单位、目标价格、配备比例、管理代码等）的审查报批工作；五是将没有争议的航空保障装备需求清单下发使用单位，如果清单有争议，应提交首长办公会审议，对于审议通过的需求清单直接下发，未通过的需求清单应组织航空装备型号总师单位重新拟制、上报。

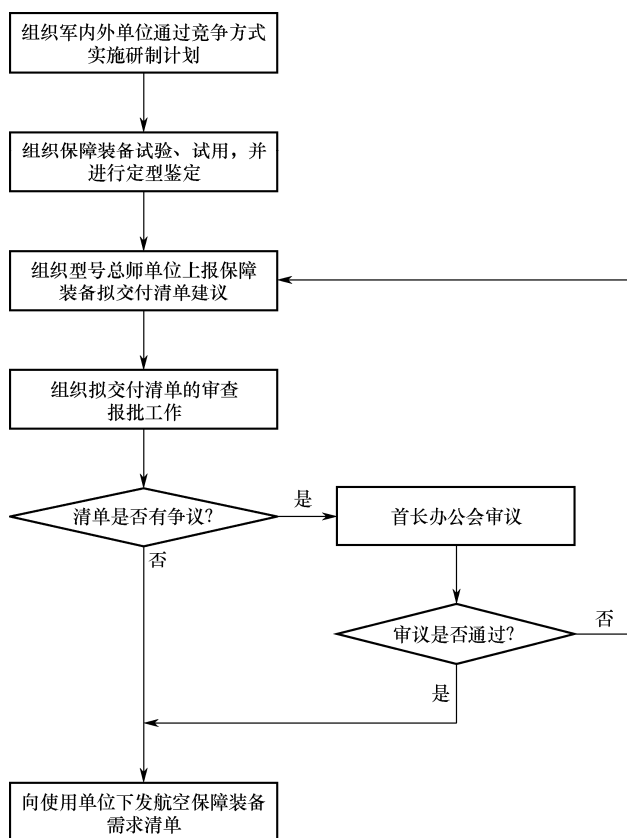


图 5-4 研制生产阶段航空保障装备数量配置流程

交付使用阶段（见图 5-5），主要由上级业务机关负责、使用单位配合参与，主要工作输出是“向使用单位交付符合清单规定内容的航空保障装备”。具体步骤为：一是使用单位在实际保障任务过程中，将航空保障装备实际需求与上级下发的需求清单进行对比分析，提出需求改进建议；二是上级业务机关综合平衡需求与可能，将清单产品列入购置（新研、改进装备等）、维修（现役须补充装备等）计划报批；三是上级业务机关组织相关部门分别

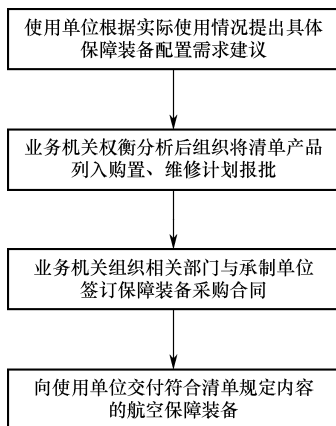


图 5-5 交付使用阶段航空保障装备数量配置流程

负责签订购置、维修计划安排的航空保障装备采购合同；四是向使用单位交付符合清单规定内容的航空保障装备，并定时（在通常情况下为每年）组织航空装备型号总师单位、相关科研院所和使用单位开展航空保障装备使用评估，提出航空保障装备改进建议。

5.2.2 后续阶段配置流程

后续阶段航空保障装备数量配置主要解决作战保障能力保持和提升的问题，重点在于根据实际需求对航空保障装备数量进行优化配置。航空保障装备在后续阶段数量配置过程中，应根据使用单位担负保障任务情况，综合权衡分析确定，一般流程如图 5-6 所示。

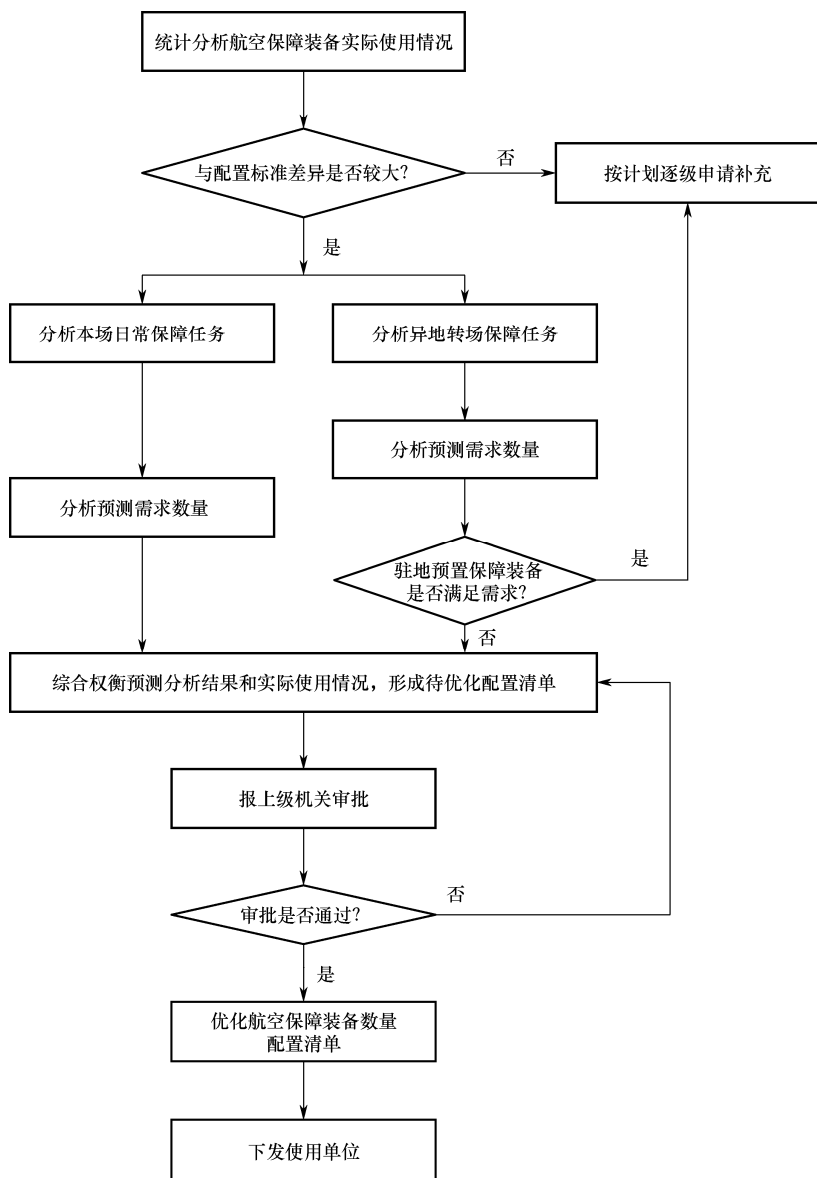


图 5-6 后续阶段航空保障装备数量配置的一般流程

航空保障装备在后续阶段的数量配置问题，实际上是使用部门对初始阶段后期上级下发的航空保障装备需求清单的再优化，目的是随使用单位保障任务的正常延续，使航空保障装备需求清单更趋近于实际需求（或消耗）情况。

后续阶段（见图 5-6），主要由使用单位负责收集航空保障装备使用情况，分析汇总并及时上报上级业务机关审批。具体步骤为：一是使用单位认真根据执行保障任务情况，统计分析航空保障装备实际使用情况；二是比较分析航空保障装备实际使用与上级配置标准之间的差异情况，如果差异不明显，则按照上级规定的航空保障装备补充计划逐级申请；三是针对实际使用与配置标准之间差异较大的情况，使用单位要区分任务性质，综合权衡分析预测航空保障装备实际需求量，并报上级业务机关审批；四是将上级业务机关审批通过的配置清单作为优化后的航空保障装备数量配置清单下发使用单位，对于未通过审批的配置清单则需要使用单位继续根据实际保障任务情况再次进行航空保障装备数量配置的分析预测。

5.3 航空保障装备数量配置的常用方法

目前，航空保障装备数量配置的常用方法主要有类比法、估算法和排队论法等。

5.3.1 类比法

1. 基本原理

类比法，也可称经验法，其基本思路是首先选择新研航空装备的相似装备，然后根据相似装备的作战单元编制、维修方案、维修专业划分等确定配置比例和配置原则，进而确定新研航空装备所需保障装备数量，一般配置原则如下。

（1）凡常用的航空装备，使用前后或再次出动准备时（如机械日、直接机务准备的工具箱），所需航空保障装备一般按 1:1 配置，不常用的视情况按 1:4、1:8 配置。

（2）修理或专业分队常用的航空保障装备按 1:4 配置，不常用的按 1:8 或 1:24 配置。

（3）非正常情况使用的航空保障装备（如作战单元修理厂附属工作间的设备）按 1:24 配置。

2. 方法过程

结合实际，以一个基本作战单元航空保障装备数量配置问题为研究对象。

已知某相似机型保障装备的配置比例为 1: $x(m)$ ，即每 x 架飞机配置 m 套（台、件等）保障装备，则新研航空保障装备配置数量为：

$$y = \begin{cases} s \cdot \frac{m}{x}, & s \cdot \frac{m}{x} \text{ 为整数} \\ \left[s \cdot \frac{m}{x} \right] + 1, & s \cdot \frac{m}{x} \text{ 为小数} \end{cases} \quad (5-1)$$

式中, y 为新研航空保障装备配置数量; s 为与新研航空保障装备对应的主装备数量; x 为所参照相似主装备的数量; m 为相似航空保障装备按照 $1:x$ 比例配置的数量; $[\]$ 为取整符号。

3. 案例说明

已知某型航空保障装备配置比例为 $1:8$ (4 套), 现某作战单元装备飞机 24 架, 则该型航空保障装备配置数量为 $24 \times \left(4 \times \frac{1}{8} \right) = 12$ (套)。

5.3.2 估算法

1. 基本原理

估算法, 也可称利用率法, 其基本思路是通过估算航空保障装备利用时间的多少, 来估算航空保障装备的配置数量。

2. 方法过程

一般可用如下公式进行估算:

$$N_d = \frac{T}{T_e} = \frac{Q \left(\sum_{i=1}^n f_i \times T_i \right)}{T_N (1 - \varepsilon)} \quad (5-2)$$

式中, N_d 为某一维修级别所需某种航空保障装备的数量; T 为某种航空保障装备年度使用时间, 单位为 h ; T_e 为每台航空保障装备全年有效工作时间, 单位为 h ; Q 为所保障的系统总数; n 为某种航空保障装备可保障的使用与维修工作项目总数; f_i 为第 i 项使用与维修工作的全年使用频度; T_i 为完成第 i 项使用与维修工作任务的时间, 单位为 h ; T_N 为全年可用于维修的工作时间 = (全年日历天数 - 全年节假日天数 - 全年非维修工作日天数) \times (一昼夜工作时间), 单位为 h ; ε 为设备计划维修停工率。

3. 案例说明

某型便携式超声波清洗机用于清洗某型号发动机燃油滤, 通常配置在作战单元修理厂, 其已知使用情况及数量配置估算过程如下。

(1) 某作战单元有某型发动机 (需要保障的系统总数) $Q=40$ 台。

(2) 该型清洗机的使用与维修工作项目只有“发动机燃油滤清洗”一项, 即 $n=1$; 且经过统计分析, 清洗机每次清洗时间 $T_i=0.5\text{h}$, 全年使用频度为 $f=10$, 计划维修停工率为 $\varepsilon=0.3$ 。

(3) 按全年日历天数 365d, 全年节假日天数 115d, 全年非维修工作日天数 150d, 一

昼夜工作时间 8h 计算, 则该修理厂全年可用于维修的工作时间为: $T_N = (365 - 115 - 150) \times 8h = 800h$ 。

(4) 将上述参数代入式 (5-2), 得出该型清洗机所需数量为: $N_d = (40 \times 10 \times 0.5) / (800 \times 0.7)$ 台 ≈ 0.36 台, 即配置 1 台即可基本符合使用要求。

5.3.3 排队论法

1. 基本原理

排队论法, 其基本思路是将航空保障装备的使用过程 (对主装备的服务过程) 看作泊松过程, 通过计算 (或作为已知约束条件) 保障系统平均利用率、等待维修保障的平均项目数 (队长)、平均等待维修保障时间 (排队时间)、平均停机时间 (顾客在系统逗留时间) 等参数, 可以得到所需航空保障装备的数量。

2. 方法过程

1) 确定模型类别

根据排队论模型的基本分类, “航空保障装备随机服务系统” 可以视为一类维修保障时间 (服务时间) 服从负指数分布、待修航空装备到达间隔时间服从负指数分布 (顾客到达服从泊松分布)、多台保障装备并列 (多服务台同时) 工作、需要维修保障的航空装备数量 (系统顾客容量) 没有限制、航空装备总数量 (顾客源) 有限、遵循先到先服务规则的排队系统, 记为 $M/M/c/\infty/m/FCFS$ 系统, 或 $M/M/c/\infty/m$ 系统。其中, M 表示负指数分布; c 表示保障装备数量; m 表示航空装备总数量, 且 $m > c$ 。

2) 计算系统平均利用率 (维修保障服务强度) ρ

$$\rho = \frac{m\lambda}{c\mu} \quad (5-3)$$

式中, λ 为航空装备需要维修率 (装备故障率、顾客到达率); μ 为航空装备修复率 (服务率); m 为航空装备总数量 (顾客总数量); c 为航空保障装备数量 (服务台数量)。

3) 计算系统状态为 n 的概率 (系统内有 n 个顾客的概率) P_n

$$P_n = \begin{cases} \frac{m!}{(m-n)!n!} \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^n \cdot P_0, & 0 \leq n \leq c \\ \frac{m!}{(m-n)!c!c^{n-c}} \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^n \cdot P_0, & c+1 \leq n \leq m \end{cases} \quad (5-4)$$

式中, P_0 为系统内没有顾客时的概率, 即保障装备均空闲的概率。

$$P_0 = \frac{1}{m!} \cdot \frac{1}{\sum_{k=0}^c \frac{1}{k!(m-k)!} \left(\frac{c\rho}{m}\right)^k + \frac{c^c}{c!} \sum_{k=c+1}^m \frac{1}{(m-k)!} \left(\frac{\rho}{m}\right)^k} \quad (5-5)$$

4) 计算不同状态下的航空装备数量 (排队队长) L

(1) 整个系统内的平均航空装备数量 (系统内平均顾客数、平均队长) L_s 为:

$$L_s = \sum_{n=1}^m n \cdot P_n \quad (5-6)$$

(2) 系统内等待修理的平均航空装备数量 (系统内平均待修顾客数、平均待修队长) L_q 为:

$$L_q = \sum_{n=c+1}^m (n-c) \cdot P_n \quad (5-7)$$

(3) L_s 和 L_q 两者的关系为:

$$L_s = L_q + \frac{\lambda}{\mu}(m - L_s) \quad (5-8)$$

5) 计算不同状态下的时间参数 W

(1) 系统内航空装备平均停机时间 (顾客平均逗留时间) W_s 为:

$$W_s = \frac{L_s}{\lambda(m - L_s)} \quad (5-9)$$

(2) 系统内航空装备平均等待修理的时间 (顾客平均等待时间) W_q 为:

$$W_q = \frac{L_q}{\lambda(m - L_s)} \quad (5-10)$$

6) 实际计算过程中的情况分析

(1) 求解最小航空保障装备配置数量为:

$$c_{\min} = \frac{m\lambda}{\mu} \quad (5-11)$$

(2) 求解最优航空保障装备配置数量。根据问题的已知情况, 选择代入相应公式计算。

3. 案例说明

某基本作战单元派出 $m=5$ 架飞机执行任务, 需要携行某型检测设备用于机上某套系统的检测、维修工作, 已知机上该系统平均故障率 $\lambda=0.5$ 次/h, 检测设备能以平均修复率 $\mu=1.5$ 套/h 修好该系统, 期望每套设备最长停工时间 $W_s=0.8$ h。

1) 最少数量配置

根据式 (5-11), 需要携行该型检测设备数量为 $c_{\min}=5 \times 0.5 / 1.5$ 台 ≈ 1.667 台, 即最少需要 2 台。

2) 最佳数量配置

将 $c=c_{\min}+1=3$ 依次代入式 (5-5)、式 (5-6) 和式 (5-9), 得到 $W_s=0.923$ h; 继续代入 $c=4$, 得到 $W_s=0.663$ h, 符合题设要求, 因此该型检测设备最优配置数量为 $c=4$ 台。

5.4 航空保障装备数量配置的仿真优化方法

航空保障装备数量配置的常用方法，如前面提到的类比法、估算法、排队论法等，不能很好地建立航空保障装备与作战训练任务、保障需求、保障流程之间的关联关系，得到的数量配置方案容易造成航空保障装备的闲置或不足。建模仿真手段不仅能够最大限度模拟作战训练任务和航空装备保障过程，而且还能从仿真“输入—输出”的角度动态分析航空保障装备数量配置方案与保障效能指标之间的关联关系，具有传统解析方法不具备的优势。但需要指出的是，仿真手段本身解决不了优化的问题，为能较为精确地确定航空保障装备数量需求，本章通过建模仿真和优化分析相结合的方式予以研究。

5.4.1 仿真优化流程

基于仿真优化的航空保障装备数量配置一般流程如图 5-7 所示。

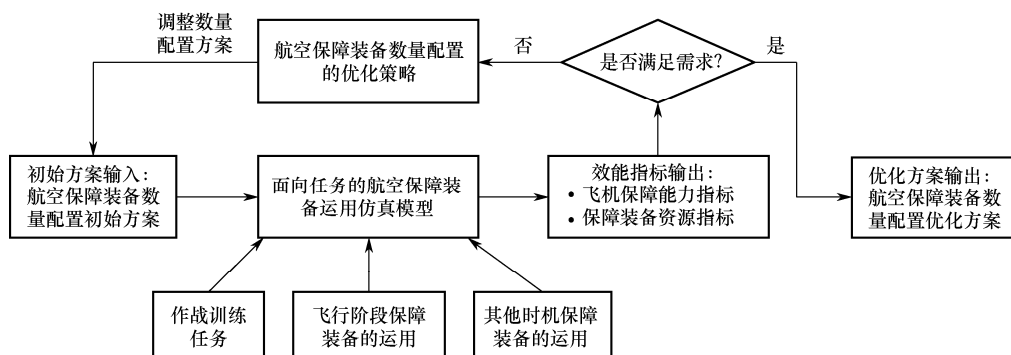


图 5-7 基于仿真优化的航空保障装备数量配置一般流程

该流程的关键在于面向任务的航空保障装备运用仿真模型和航空保障装备数量配置的优化策略。面向任务的航空保障装备运用仿真模型，采取离散事件驱动原理，通过模拟在一定作战训练任务下航空装备及其保障装备的运用过程，运用蒙特卡洛方法分析作战单元在任务阶段航空保障装备数量配置方案下的保障效能指标输出；如果保障效能指标输出不满足需求，则根据既定的优化策略调整航空保障装备数量配置方案，反复迭代直到配置方案的保障效能指标满足需求为止。航空保障装备数量配置的优化策略主要是根据仿真结果，通过迭代过程，改变现有候选解的位置以得到更好解的策略，确保能够快速调整航空保障装备数量配置方案以达到保障效能目标值。

5.4.2 仿真优化目标

为突出面向作战训练任务的航空保障装备精确配置原则，选取反映外场飞行保障过程

中的典型动态能力指标进行研究,包括飞机最大保障时间、飞机平均保障时间、航空保障装备利用率、航空保障装备满足率等。其中,飞机最大保障时间、飞机平均保障时间反映了航空保障装备对飞机保障效能的影响;航空保障装备利用率、航空保障装备满足率反映了航空保障装备自身资源利用和满足的有效程度。

1. 飞机最大保障时间

飞机最大保障时间用于描述每个任务批次航空装备保障作业全过程中所消耗的最长保障时间。

$$T_{k\max} = \max\{T_{ki}\} \quad (k=1, 2, \dots, m; i=1, 2, \dots, n) \quad (5-12)$$

式中, T_{ki} 为第 k 次任务、第 i 架飞机的保障时间; $T_{k\max}$ 为第 k 次任务的飞机最大保障时间。

2. 飞机平均保障时间

飞机平均保障时间用于描述每个任务批次航空装备保障作业全过程中消耗的平均保障时间。

$$T_{k\text{ave}} = \frac{\sum_{i=1}^n T_{ki}}{n} \quad (k=1, 2, \dots, m; i=1, 2, \dots, n) \quad (5-13)$$

式中, $T_{k\text{ave}}$ 为第 k 次任务的飞机平均保障时间。

3. 航空保障装备利用率

航空保障装备利用率表示各类航空保障装备任务阶段使用时间占总时间的比例。

$$U_k = \frac{\sum_{i=1}^{m_k} t_{ki}}{m_k \cdot T} \quad (5-14)$$

式中, U_k 为第 k 类航空保障装备的利用率; m_k 为第 k 类航空保障装备的配置数量; t_{ki} 为第 k 类第 i 台航空保障装备的使用时间; T 为任务阶段总时间。

4. 航空保障装备满足率

航空保障装备满足率表示各类航空保障装备在任务阶段直接响应需求(没有等待延误)次数与总使用次数的比例。

$$A_k = \frac{n_k}{N_k} \quad (5-15)$$

式中, A_k 为第 k 类航空保障装备的满足率; n_k 为第 k 类航空保障装备直接响应保障需求的次数; N_k 为第 k 类航空保障装备的总使用次数。

一般来说,航空保障装备数量配置越多,飞机的最大保障时间、平均保障时间、航空保障装备利用率会有所下降,而航空保障装备满足率会有所提高。在实际仿真优化过程中,需要对相关指标提出约束要求。

5.4.3 仿真优化策略

当航空保障装备利用率较高时，满足率相对会降低，飞机保障时间会相对增加。针对这一特点，选用一种单目标、启发式单步迭代的方法，其特点是算法简单，便于与仿真结果进行联合分析。

基于上述分析，以航空保障装备利用率指标为核心指标，以其他指标为参考指标，根据指标值的大小不断迭代优化航空保障装备数量配置方案，具体步骤如下。

(1) 设定初始航空保障装备数量配置方案。为便于仿真优化，不同类型航空保障装备配置数量初始值可以设定为较小值，如数量都设为“1”。

(2) 构建并运行面向任务的航空保障装备运用仿真模型。通过仿真和统计分析，得到任务阶段飞机最大保障时间、平均保障时间，以及各类型航空保障装备利用率和满足率指标。

(3) 以航空保障装备利用率指标为第一优化指标，兼顾航空保障装备满足率，以及飞机最大保障时间、平均保障时间等参考指标，根据指标值的大小不断调整航空保障装备数量配置方案。具体策略为：如果不满足保障效能目标要求，选择利用率最高的航空保障装备，增加一个该类型航空保障装备，然后返回到第(2)步重新迭代，直至满足目标要求。

5.4.4 案例分析

航空四站保障装备是飞行保障阶段运用最为广泛的一种保障资源。本案例基于Extendsim 8.0 仿真平台，确定任务飞行保障阶段航空四站保障装备的数量。

1. 基本想定

1) 飞行训练任务想定

重点考虑飞机出动批次、批次出动数量、出动间隔时间等因素。假定飞行训练任务想定为：3 批次连续出动、每批次为 4 机编队、每批次间隔时间 15min。

2) 航空四站保障装备想定

本案例仅考虑飞行保障阶段使用频率较高，且与飞机存在物质能量交换的充氧车、充氮车、空调车、电源车 4 种航空四站保障装备。

3) 航空四站保障过程想定

航空四站保障装备使用要求如下。

(1) 受外场保障作业空间的限制，假定每架飞机最多只能接受两辆不同航空保障装备同时开展作业。

(2) 为避免安全事故的发生，充电与充氧、加油与充氧不能够同时开展作业。

根据航空四站保障装备使用要求和实际情况，为便于仿真分析，将航空四站保障过程简化为图 5-8。

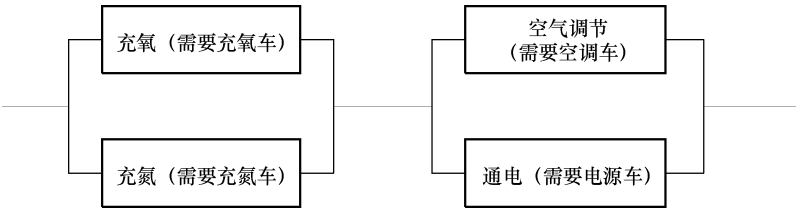


图 5-8 典型航空四站保障过程

- 根据外场使用经验，确定航空四站保障装备使用参数如下。
- (1) 假设飞行机务准备过程充氧车作业时间服从 (3, 4, 5) 的三角分布，充氮车作业时间服从 (6, 0.5) 的正态分布，空调车作业时间服从 15min 的常数分布，电源车作业时间服从 30min 的常数分布。
 - (2) 考虑氧气与氮气只有在不能满足下一飞行任务的气体压力要求情况下才需要灌注，因此案例中假设每次飞行机务准备需要充氧车的概率为 1/2，需要充氮车的概率为 2/3。

2. 仿真模型

基于 ExtendSim 8.0 仿真平台建立航空四站保障装备数量配置仿真模型，总体框架如图 5-9 所示。该仿真模型主要包括飞行训练任务、飞机实体、航空四站保障过程、航空四站保障装备资源、航空四站保障效能指标输出等仿真模块，每个模块中又包括若干个子模块。

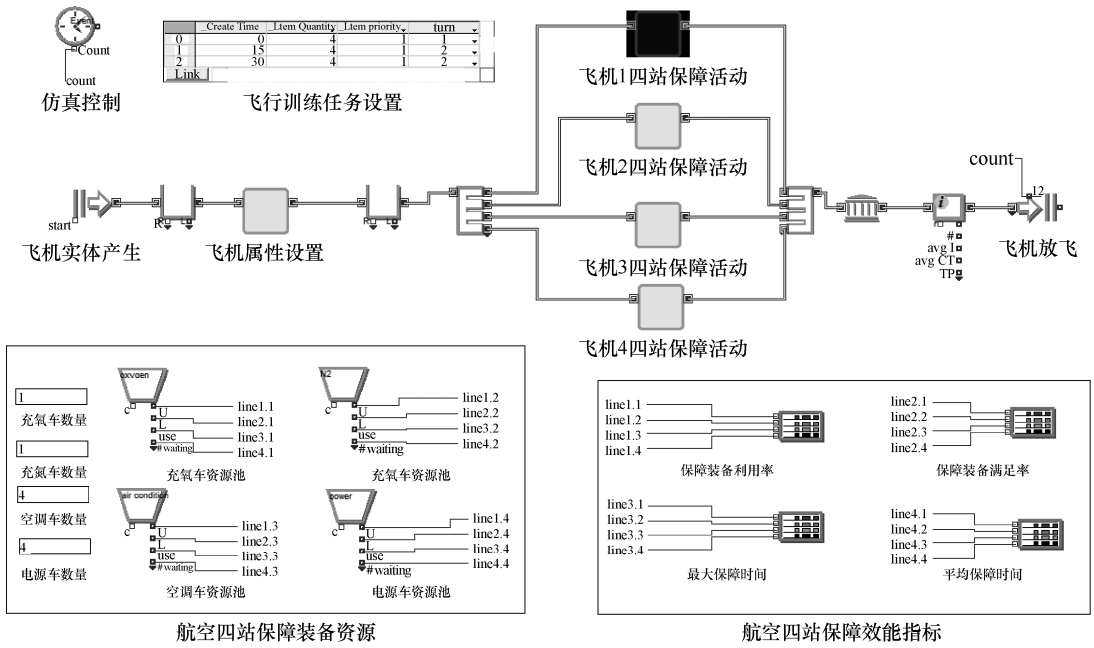


图 5-9 航空四站保障装备数量配置仿真模型总体框架

3. 结果优化

1) 优化策略

按照 5.4.3 节中的仿真优化策略, 根据仿真计算得到的航空四站保障装备利用率, 不断调整相应的航空四站保障装备数量配置方案。假设某航空四站保障装备利用率较高, 说明支持该项保障作业的保障装备数量配置较少, 是影响保障效率的瓶颈; 为减少飞机保障时间、提升航空四站保障装备满足率, 应增加利用率较高的航空四站保障装备数量。

2) 优化目标

- (1) 第 1 任务批次飞机最长保障时间不超过 45min, 平均保障时间不超过 40min。
- (2) 所有类型航空四站保障装备利用率不低于 0.25, 所有类型航空四站保障装备满足率不低于 0.3。

3) 结果分析

为避免单次仿真结果的随机性, 对优化迭代过程中的不同航空四站保障装备数量配置方案, 系统分别运行 3 次, 统计在不同配置方案下不同任务批次的飞机最大保障时间、平均保障时间, 以及整个任务阶段航空四站保障装备的利用率、满足率, 相关结果如表 5-1 和表 5-2 所示。

表 5-1 不同航空四站保障装备数量配置方案下的飞机保障时间指标

| 航空四站保障装备数量 (台) | | | | 最大保障时间 (min) | | |
|----------------|-----|-----|-----|--------------|----------|----------|
| 充氧车 | 充氮车 | 空调车 | 电源车 | 任务批次 1 | 任务批次 2 | 任务批次 3 |
| 1 | 1 | 1 | 1 | 154.511 | 229.511 | 334.511 |
| 1 | 1 | 1 | 2 | 69.221 | 114.221 | 159.221 |
| 1 | 1 | 1 | 3 | 67.274 | 105 | 150 |
| 1 | 1 | 2 | 3 | 65.19533 | 84.253 | 104.5493 |
| 1 | 1 | 2 | 4 | 43.13967 | 58.13967 | 73.13967 |
| 1 | 1 | 2 | 5 | 42.7231 | 57.7231 | 72.7231 |
| 1 | 1 | 3 | 5 | 44.04 | 59.04 | 74.04 |
| 1 | 1 | 3 | 6 | 45.89567 | 60.89567 | 75.89567 |
| 1 | 1 | 4 | 6 | 48.81833 | 63.81833 | 78.81833 |
| 1 | 2 | 4 | 6 | 41.79067 | 56.79067 | 71.79067 |
| 航空四站保障装备数量 (台) | | | | 平均保障时间 (min) | | |
| 充氧车 | 充氮车 | 空调车 | 电源车 | 任务批次 1 | 任务批次 2 | 任务批次 3 |
| 1 | 1 | 1 | 1 | 79.61374 | 184.6137 | 289.6137 |
| 1 | 1 | 1 | 2 | 50.03063 | 95.03063 | 146.4195 |
| 1 | 1 | 1 | 3 | 46.73138 | 86.25 | 127.5 |
| 1 | 1 | 2 | 3 | 44.75169 | 67.65716 | 91.77841 |
| 1 | 1 | 2 | 4 | 37.32162 | 52.32162 | 67.32162 |
| 1 | 1 | 2 | 5 | 39.36968 | 54.36968 | 69.36968 |
| 1 | 1 | 3 | 5 | 39.67642 | 54.67642 | 69.67642 |
| 1 | 1 | 3 | 6 | 40.45779 | 55.45779 | 70.45779 |
| 1 | 1 | 4 | 6 | 42.74593 | 57.74593 | 72.74593 |
| 1 | 2 | 4 | 6 | 38.89495 | 53.89495 | 68.89495 |

表 5-2 不同航空四站保障装备数量配置方案下的保障资源指标

| 航空四站保障装备数量（台） | | | | 航空四站保障装备利用率 | | | |
|---------------|-----|-----|-----|--------------|--------------|--------------|--------------|
| 充氧车 | 充氮车 | 空调车 | 电源车 | 充氧车平均 利用率 | 充氮车平均 利用率 | 空调车平均 利用率 | 电源车平均 利用率 |
| 1 | 1 | 1 | 1 | 0.095667 | 0.123667 | 0.739367 | 0.987633 |
| 1 | 1 | 1 | 2 | 0.1294 | 0.310467 | 0.951367 | 0.951367 |
| 1 | 1 | 1 | 3 | 0.2194 | 0.24229 | 1 | 0.666667 |
| 1 | 1 | 2 | 3 | 0.160033 | 0.4315 | 0.739333 | 0.892033 |
| 1 | 1 | 2 | 4 | 0.305333 | 0.4993 | 0.872733 | 0.872733 |
| 1 | 1 | 2 | 5 | 0.3544 | 0.4815 | 0.8761 | 0.7009 |
| 1 | 1 | 3 | 5 | 0.318167 | 0.418333 | 0.6877 | 0.692233 |
| 1 | 1 | 3 | 6 | 0.2955 | 0.469567 | 0.706367 | 0.566667 |
| 1 | 1 | 4 | 6 | 0.2728 | 0.532167 | 0.608133 | 0.5525 |
| 1 | 2 | 4 | 6 | 0.286667 | 0.261 | 0.629 | 0.589333 |
| 航空四站保障装备数量（台） | | | | 航空四站保障装备满足率 | | | |
| 充氧车 | 充氮车 | 空调车 | 电源车 | 充氧车平均 满足率 | 充氮车平均 满足率 | 空调车平均 满足率 | 电源车平均 满足率 |
| 1 | 1 | 1 | 1 | 0.316667 | 0.227513 | 0.083333 | 0.083333 |
| 1 | 1 | 1 | 2 | 0.490079 | 0.100673 | 0.083333 | 0.166667 |
| 1 | 1 | 1 | 3 | 0.2 | 0.1429 | 0.083333 | 0.25 |
| 1 | 1 | 2 | 3 | 0.583333 | 0.100673 | 0.166667 | 0.25 |
| 1 | 1 | 2 | 4 | 0.355556 | 0.202646 | 0.166667 | 0.333333 |
| 1 | 1 | 2 | 5 | 0.333333 | 0.25 | 0.166667 | 0.333333 |
| 1 | 1 | 3 | 5 | 0.282407 | 0.277778 | 0.416667 | 0.333333 |
| 1 | 1 | 3 | 6 | 0.375 | 0.157407 | 0.361111 | 0.333333 |
| 1 | 1 | 4 | 6 | 0.442857 | 0.140741 | 0.694444 | 0.361111 |
| 1 | 2 | 4 | 6 | 0.375 | 0.46714 | 0.638889 | 0.333333 |

从表 5-1 和表 5-2 可看出，随着航空四站保障装备数量的迭代增加，不同任务批次飞机最大保障时间、平均保障时间都在降低。当充氧车、充氮车、空调车、电源车数量优化配置为 1、2、4、6 台时，满足优化目标要求，是符合任务出动需求的航空四站保障装备数量配置方案。

为了更详细的说明，下面以航空四站保障装备的利用率、飞机最大保障时间为例，分析相关指标在航空四站保障装备数量配置方案优化过程中的变化情况。图 5-10 给出了航空四站保障装备利用率随配置优化过程的变化情况，图 5-11 给出了不同任务批次飞机最大保障时间随配置优化过程的变化情况。

从图 5-10 可以看出，随着空调车、电源车数量的增加，利用率水平整体上有降低的趋势；在充氧车、充氮车数量基本不变的情况下，利用率水平整体上有增加的趋势，原因在于随着空调车、电源车数量的增加，减少了排队等待时间，间接使任务阶段的航空四站保障总时间缩短。

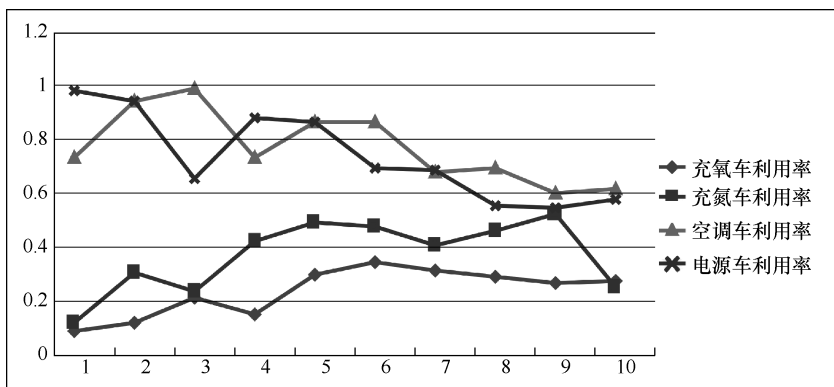


图 5-10 航空四站保障装备利用率随配置优化过程的变化情况

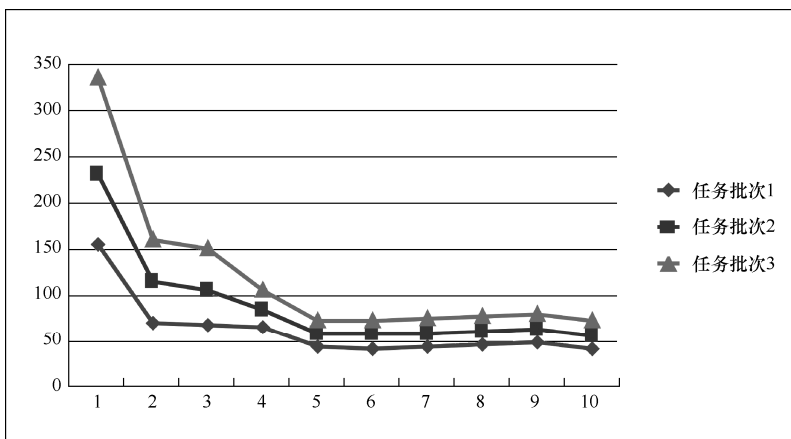


图 5-11 不同任务批次飞机最大保障时间随配置优化过程的变化情况

从图 5-11 可以看出，随着航空四站保障装备数量的不断增加，不同任务批次飞机的最大保障时间不断下降，在配置方案优化初期飞机最大保障时间下降速度较快，后期逐渐稳定且变化较小。另外，从多个任务批次的对比情况看，后一个任务批次相对前一个任务批次飞机最大保障时间有所增加，原因在于前一个任务批次未完成的保障工作会不断占用后一个任务批次需要的保障装备，从而导致时间迟滞的现象发生。时间迟滞现象在战时或战备演练高强度飞行任务下，会更加严重。为解决该问题，必须适当牺牲经济性，增加航空四站保障装备数量，以优先保证任务的完成。

5.5 航空保障装备数量配置的综合优化方法

5.5.1 问题描述

航空保障装备的数量配置不仅会影响航空装备的战备完好性水平，也会影响航空装备保障系统的机动性、经济性。前面提到的排队论法只能考虑单一类型航空保障装备及单一效能目标；仿真方法虽可考虑多个类型航空保障装备和多个效能目标，但不能建立作战单

元多类型航空保障装备的效能目标与单类型航空保障装备的效能目标之间的关联关系，以及考虑不同效能目标之间的约束关系，从而无法确保作战单元保障站点内各类航空保障装备数量配置整体最优。

为此，有必要同时考虑航空保障装备利用率、满足率、体积、重量、费用、等待时间等指标，建立作战单元多类型航空保障装备的效能目标与单类型航空保障装备的效能目标之间的关联关系，并对多类型航空保障装备数量配置问题进行数学建模描述和综合优化分析。

1. 效能指标计算

1) 作战单元航空保障装备平均利用率

$$U_s = \frac{\sum_{k=1}^m U_k \cdot x_k}{\sum_{k=1}^m x_k} \quad (k=1, 2, \dots, m) \quad (5-16)$$

式中， U_s 为作战单元保障站点内航空保障装备平均利用率； x_k 为作战单元保障站点内第 k 类航空保障装备的数量； U_k 为作战单元保障站点内第 k 类航空保障装备的利用率，可通过前面章节中的排队论法或仿真优化法予以确定。

2) 作战单元航空保障装备平均满足率

$$S_s = \frac{\sum_{k=1}^m S_k \cdot \lambda_k}{\sum_{k=1}^m \lambda_k} \quad (k=1, 2, \dots, m) \quad (5-17)$$

式中， S_s 为作战单元保障站点内航空保障装备平均满足率； λ_k 为作战单元保障站点内第 k 类航空保障装备的需求率，单位为次/h； S_k 为作战单元保障站点内第 k 类航空保障装备的满足率，可通过前面章节中的排队论法或仿真优化法予以确定。

3) 作战单元航空保障装备平均等待时间

$$T_s = \frac{\sum_{k=1}^m T_k \cdot x_k}{\sum_{k=1}^m x_k} \quad (k=1, 2, \dots, m) \quad (5-18)$$

式中， T_s 为作战单元保障站点内航空保障装备平均等待时间； T_k 为作战单元保障站点内第 k 类航空保障装备的平均等待时间。

4) 作战单元航空保障装备费用

$$C_s = \sum_{k=1}^m C_k \times x_k \quad (k=1, 2, \dots, m) \quad (5-19)$$

式中， C_s 为作战单元保障站点内航空保障装备的总购置费用或总维修费用； C_k 为作战单元保障站点内第 k 类航空保障装备单台（套）的购置费用或维修费用。

5) 作战单元航空保障装备体积

$$V_s = \sum_{k=1}^m V_k \times x_k \quad (k=1, 2, \dots, m) \quad (5-20)$$

式中, V_s 为作战单元保障站点内航空保障装备的总体积; V_k 为作战单元保障站点内第 k 类航空保障装备单台(套)的体积。

6) 作战单元航空保障装备重量

$$W_s = \sum_{k=1}^m W_k \times x_k \quad (k=1, 2, \dots, m) \quad (5-21)$$

式中, W_s 为作战单元保障站点内航空保障装备的总重量; W_k 为作战单元保障站点内第 k 类航空保障装备单台套的重量。

2. 综合优化模型

航空保障装备数量配置的综合优化问题可以描述为: 求解作战单元保障站点内各类型航空保障装备数量, 使作战单元航空保障装备平均利用率、平均满足率最大, 作战单元航空保障装备的平均等待时间、费用、体积、重量最小。其数学表达式为:

$$\begin{aligned} & \max U_s, S_s \\ & \min T_s, C_s, V_s, W_s \\ & \text{s.t. } x_k \geq 0 \quad (k=1, 2, \dots, m) \end{aligned} \quad (5-22)$$

由于直接求解多目标优化问题较为困难, 一般的解决思路是将多目标优化问题转化为单目标多约束的问题。假设以作战单元航空保障装备平均满足率为优化目标, 以作战单元航空保障装备平均利用率、平均等待时间、费用、体积、重量为联合约束, 上述航空保障装备数量配置综合优化模型可以转化为:

$$\begin{aligned} & \max S_s \\ & \text{s.t. } U_{s0} \leq U_s \leq 1 \\ & \quad T_s \leq T_{s0} \\ & \quad C_s \leq C_{s0} \\ & \quad V_s \leq V_{s0} \\ & \quad W_s \leq W_{s0} \\ & \quad x_k \geq 0 \quad (k=1, 2, \dots, m) \end{aligned} \quad (5-23)$$

式中, U_{s0} 为作战单元航空保障装备平均利用率的允许最小值; T_{s0} 、 C_{s0} 、 V_{s0} 、 W_{s0} 为作战单元航空保障装备平均等待时间、费用、体积、重量的允许最大值。在工程实践中, 可以根据问题需求和数据获取情况, 灵活选择优化目标, 适当放宽约束条件。例如, 在航空保障装备数量初始配置时, 外场使用数据较难获取, 保障规模约束(体积或重量)可暂不考虑, 重点关注采购费用约束; 而在使用阶段的机动转场等活动中, 保障规模的约束则须重点考虑。

5.5.2 基于粒子群算法的综合优化

航空保障装备数量配置综合优化问题具有目标函数非线性、约束条件不唯一等特点, 适宜选用智能优化算法予以分析计算。为此, 本章采用粒子群算法对其进行求解。

1. 粒子群算法基本思想

粒子群算法是计算智能领域中除了蚁群算法、鱼群算法之外的一种群体智能优化算法，该算法最早由 Kennedy 和 Eberhart 在 1995 年提出。粒子群算法源于对鸟类捕食行为的研究，鸟类捕食时，找到事物最简单有效的策略就是搜寻当前距离食物最近的鸟的周围区域。粒子群算法是从这种生物种群行为特征中得到启发并用于求解优化问题的，算法中每个粒子都代表问题的一个潜在解，每个粒子对应一个由适应度函数决定的适应度值。粒子的速度决定了粒子移动的方向和距离，速度随自身及其他粒子的移动经验进行调整，从而实现个体在可解空间的寻优。

2. 基于粒子群算法的求解步骤

1) 粒子编码

每个粒子表示多类型航空保障装备数量配置的一个解，粒子各维表示的意义为每个类型的航空保障装备配置数量。粒子 i 的位置和速度分别表示为：

$$X_i(t) = (x_{i1}(t), x_{i2}(t), \dots, x_{ij}(t)) \quad (5-24)$$

$$V_i(t) = (v_{i1}(t), v_{i2}(t), \dots, v_{ij}(t)) \quad (5-25)$$

式中， $x_{ij}(t)$ 为在 t 时刻第 i 个粒子、第 j 类航空保障装备的配置数量； $v_{ij}(t)$ 为相应粒子的速度。

2) 初始化

粒子群的初始化实际上是对每个粒子的位置和速度的初始化。对粒子 i 的初始化实质上是对每类航空保障装备配置数量初始化；对粒子速度的初始化就是对进行第一次迭代的粒子各维移动距离的初始化；根据问题规模设置种群大小 N ，计算各粒子适应度，以及初始个体最优位置 $pbest$ 和全局最优位置 $gbest$ 。

3) 粒子移动

粒子移动速度的公式调整为：

$$V_i(t+1) = \omega V_i(t) + c_1 r_1 [pbest_i(t) - X_i(t)] + c_2 r_2 [gbest(t) - X_i(t)] \quad (5-26)$$

式中， ω 为惯性权重； c_1 、 c_2 为加速因子； r_1 、 r_2 为 $[0, 1]$ 内的随机数。

通过向量的计算对粒子速度的各维进行改变。为防止粒子过快地从搜索空间的一个区域飞向另一个区域，将粒子各维速度限制在 $[-v_{\max}, v_{\max}]$ 之内，即：

$$v_{ij}(t) = \begin{cases} v_{\max}, & v_{ij}(t) > v_{\max} \\ -v_{\max}, & v_{ij}(t) < -v_{\max} \end{cases} \quad (5-27)$$

式中， v_{\max} 应小于粒子活动范围。

4) 位置的更新与越界处理

$$X_i(t+1) = X_i(t) + V_i(t) \quad (5-28)$$

式中，对粒子的位置进行四舍五入取整处理，对于越界的粒子，其越界的维取靠近的边界值。

5) 根据约束条件对粒子进行判断

当粒子的某个维不可行（不满足约束条件）时，如果按照迭代速度继续更新位置，将

改变所有维，既降低了搜索效率，又容易错过最优位置。针对这种情况，应对粒子进行异步处理，即只改变不可匹配的粒子维，其他维保持不变。处理方法如下：将速度向量中匹配可行的维置为“0”，将其他各维置为原值，按照重置的速度继续更新粒子位置，直至粒子所有维均可匹配。

6) 粒子适应度计算

$$\text{fitness} = S_s \quad (5-29)$$

7) 个体极值和群体极值更新

粒子群算法流程如图 5-12 所示。

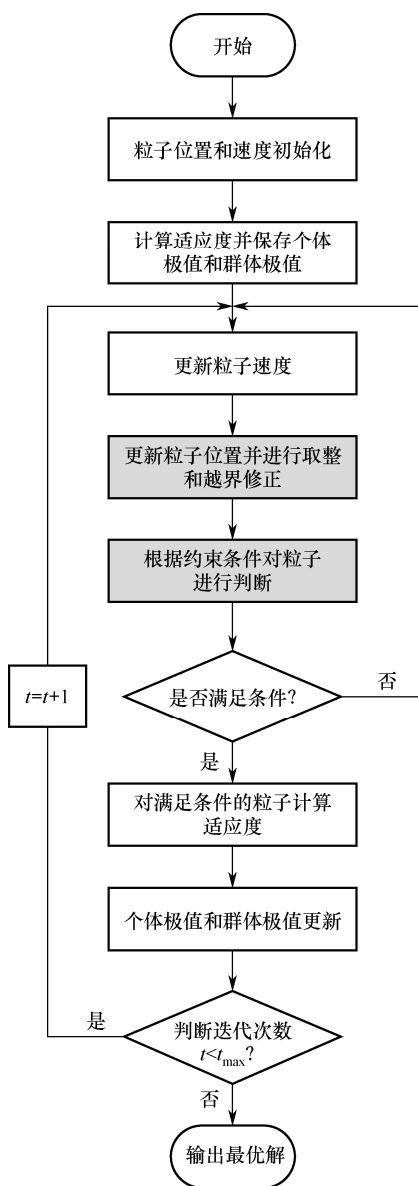


图 5-12 粒子群算法流程

5.5.3 案例分析

某作战单元出动 12 架飞机执行异地轮战任务，为保证飞机战备完好，需要携行 5 种类型的外场检测设备，以定位故障后更换 LRU。要求在保证外场检测设备平均满足率最大，同时外场检测设备平均利用率不低于 0.2，外场检测设备机动携行体积不超过 1m³、重量不超过 60kg 的情况下，试确定各类型外场检测设备的携行量。假设执行任务期间飞机需要外场检测设备的需求率都服从泊松分布，外场检测设备的保障时间都服从指数分布，相关数据如表 5-3 所示。

表 5-3 航空外场检测设备数据

| 保障装备名称 | 保障活动 | 保障装备数量需求（个） | 保障装备需求率λ（h） | 保障装备平均服务时间 1/μ（h） | 保障装备体积（m ³ ） | 保障装备重量（kg） |
|----------|------------|-------------|-------------|-------------------|-------------------------|------------|
| 外场检测设备 1 | 定位并更换 LRU1 | 1 | 0.025 | 2.5 | 0.075 | 1 |
| 外场检测设备 2 | 定位并更换 LRU2 | 1 | 0.045 | 1 | 0.098 | 10 |
| 外场检测设备 3 | 定位并更换 LRU3 | 1 | 0.01 | 2 | 0.0004 | 0.5 |
| 外场检测设备 4 | 定位并更换 LRU4 | 1 | 0.0175 | 1.5 | 0.003 | 0.5 |
| 外场检测设备 5 | 定位并更换 LRU5 | 1 | 0.02 | 3 | 0.288 | 30 |

根据航空保障装备数量配置综合优化问题的分析，该问题可以描述为：

$$\max S_s = \frac{\sum_{k=1}^m S_k \cdot \lambda_k}{\sum_{k=1}^m \lambda_k}$$

要求：

$$0.2 \leq U_s = \frac{\sum_{k=1}^m U_k \cdot x_k}{\sum_{k=1}^m x_k} \leq 1$$

$$V_s = \sum_{k=1}^5 V_k \times x_k \leq 1$$

$$W_s = \sum_{k=1}^5 W_k \times x_k \leq 60$$

$$x_k \geq 0 \quad (k = 1, 2, \dots, m)$$

其中，根据排队论法的理论知识，可以得到如下公式。

(1) 第 k 类航空保障装备的利用率为：

$$U_k = \frac{n \times \lambda_k}{x_k \times \mu_k} \leq 1$$

(2) 第 k 类航空保障装备的满足率为:

$$S_k = 1 - \frac{\lambda_k^{x_k} \left(\left(\sum_{j=0}^{x_k-1} \frac{n^j \times \lambda_k^j}{\mu_k^j \times j!} \right) + \frac{1}{x_k!} \left(\frac{n \lambda_k}{\mu_k} \right)^{x_k} \times \left(\frac{1}{1-U_k} \right) \right)^{-1}}{\mu_k^{x_k} \times x_k! \times (1-U_k)}$$

式中, n 为飞机数量; λ_k 为第 k 类航空保障装备的需求率; μ_k 为第 k 类航空保障装备的服务率。

针对上述数学问题, 采用粒子群算法进行求解。粒子群算法参数设置为: 种群规模 $N=20$, 惯性权重 $\omega=0.5$, 加速因子 $c_1=c_2=1.49$, 迭代次数 $\text{iter}=100$ 。粒子群仿真优化过程如图 5-13 所示。

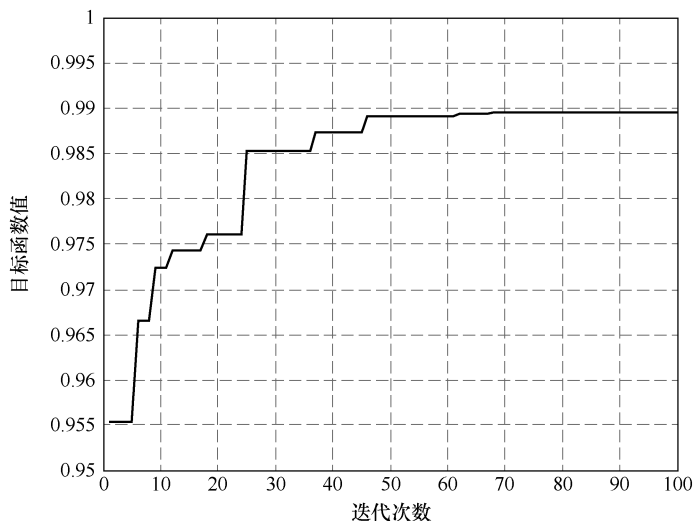


图 5-13 粒子群仿真优化过程

根据仿真结果, 最优解粒子的位置为 $\text{gbest}=[3, 2, 2, 3, 1]$, 即 5 型外场检测设备的携行量分别为 3, 2, 2, 3, 1。此时目标函数值, 即平均满足率 $S_s=0.9895$ 。

5.6 航空保障装备数量配置方法的选择

5.6.1 数量配置方法的适应性分析

不同的航空保障装备数量配置方法, 如类比法、估算法、排队论法、仿真优化法、综合优化法等, 使用条件不同、适应范围不同, 各有优缺点。为便于使用, 研究人员结合应用实际, 提供了可选择的适合的航空保障装备数量配置方法, 表 5-4 从方法使用条件、优缺点、适用范围等方面对航空保障装备数量配置方法的适应性进行了分析。

表 5-4 航空保障装备数量配置方法的适应性分析

| 方法 | 使用条件 | 优点 | 缺点 | 适用范围 |
|-------|--|---|--|---|
| 类比法 | 航空装备与配套航空保障装备之间具有明确的数量配套比例关系 | 原理、方法简单, 确定过程直观, 便于操作, 能够快速确定航空保障装备数量 | 依赖于传统经验, 配置数量精度不高 | ①一般用于满足宏观决策要求; ②一般适用于初始阶段航空保障装备的配置或后续阶段低价值航空保障装备的配置 |
| 估算法 | 需要综合考虑航空装备数量、维修保障方案、航空保障装备工作频度、单次工作时间、平均可利用时间等参数, 通过航空保障装备工作时间估算保障装备数量 | 考虑因素较多, 符合实际情况 | ①统计相关时间参数较难, 精度不高; ②估算结果偏保守, 不能有效解决多个保障任务同时占用航空保障装备的资源冲突问题 | ①一般用于满足宏观决策要求; ②一般适用于使用频率较高且保障任务无明显使用资源冲突的航空保障装备 |
| 排队论法 | ①航空装备占用保障装备的需求是一个随机过程, 即在 t 时间内有 k 个需要使用保障装备的航空装备概率服从泊松分布; ②航空保障装备的作业时间服从指数分布 | 在本质上是解析计算方法, 结果较为精确, 得到的配置数量较为充足(按上限控制) | ①方法相对复杂, 假设条件和使用限制较多, 对航空装备故障间隔时间、维修时间的分布规律有严格限制; ②模型计算只能同时考虑一种类型航空保障装备 | 一般适用于价值较高、任务阶段有明显资源冲突, 且主要用于修复性维修工作的航空保障装备的数量确定 |
| 仿真优化法 | ①需要建立面向任务的航空保障装备运用仿真模型; ②需要在仿真的基础上, 采取合适的优化策略确定航空保障装备数量 | ①计算精确, 可最大限度模拟航空装备作战训练、维修保障任务及航空保障装备运用过程; ②对航空保障装备使用需求、作业时间分布规律没有严格限制; ③能从仿真“输入—输出”的角度动态分析航空保障装备数量与保障效能指标之间的关联关系; ④可同时用于多类型航空保障装备数量的配置 | ①需要通过多次仿真, 不断迭代优化才能确定航空保障装备数量; ②建模工作量较大 | ①一般适用于难以用解析方法确定、受任务影响较大的高价值航空保障装备; ②仿真的目的侧重于分析航空保障装备数量对保障效能的影响 |
| 综合优化法 | 需要在排队论法或仿真优化法的基础上, 建立作战单元多类型航空保障装备的效能目标与单类型航空保障装备的效能目标之间的关联关系, 在此基础上进行多目标综合优化 | ①能够集成排队论法、仿真优化法等常用方法; ②注重系统效能最优, 可同时用于多类型航空保障装备数量的配置 | 计算较为复杂, 工作量大, 对原始数据要求精确度高 | ①一般适用于约束较多、配置精度要求较高的高价值航空保障装备的数量确定; ②能够确保作战单元航空保障装备效能整体最优 |

5.6.2 数量配置方法的逻辑决策

在对航空保障装备数量配置方法进行适应性分析的基础上，为实现航空保障装备数量配置方法的合理选择，有必要针对航空保障装备的类型特点，从逻辑决策的角度推荐最适宜的航空保障装备数量配置方法。这里，航空保障装备的类型特点主要考虑价值、使用频率和使用功能等方面。

经系统分析和充分研讨，构建了作战单元航空保障装备数量配置方法的逻辑决断框架，如图 5-14 所示。

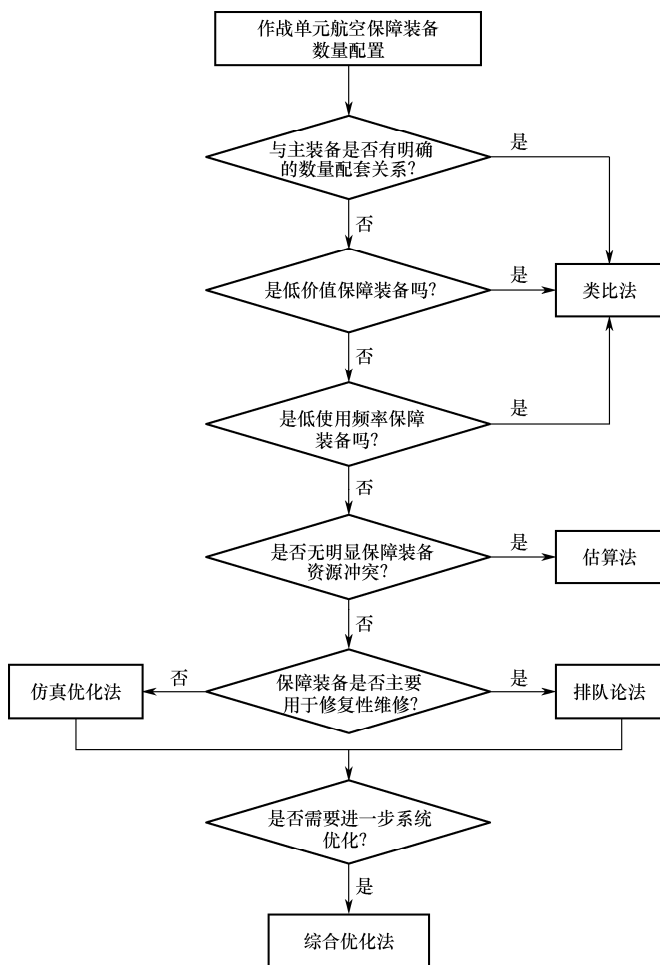


图 5-14 作战单元航空保障装备数量配置方法的逻辑决断框架

另外，从航空保障装备配置阶段的角度来看，类比法、估算法一般较适合在初始阶段使用；排队论法、仿真优化法和综合优化法较适合在后续阶段对现状问题改进优化时使用。从作战训练保障的角度来看，上述所有方法都可用于平时本场训练航空保障装备需求的确定；在执行异地机动保障时，需要考虑携行规模和任务完好需求，一般选择仿真优化法或综合优化法确定航空保障装备的数量。

规划阶段航空保障装备方案效能仿真评估

本章针对规划阶段航空保障装备方案效能评估具有的不确定性、验证滞后性等特点，构建了航空保障装备方案效能仿真评估的一般流程、支撑模型、核心算法策略，并通过典型案例说明了规划阶段航空保障装备方案效能仿真评估的过程。

6.1 规划阶段航空保障装备方案效能仿真评估概述

6.1.1 规划阶段航空保障装备方案效能评估特点

在新研航空装备立项论证、方案设计和研制生产阶段，研制方要根据订购方的要求提出航空保障装备配套建议，并经订购方审核批准形成配套航空保障装备交付清单。在部署使用阶段，使用方要根据航空保障装备实际使用现状和部队需求，定期规划修订航空保障装备配备标准。在上述过程中，都要生成初步的航空保障装备方案，并经过方案效能评估，反复迭代、权衡和优化，最终确定优化的航空保障装备方案。由于上述两种情况都属于航空保障装备方案实施前的规划阶段，方案效能评估研究的本质基本类似，这里将它们统称为规划阶段航空保障装备方案效能评估。

规划阶段航空保障装备方案效能评估的主要特点如下。

(1) 评估过程需要反复迭代。由于规划阶段航空保障装备方案效能评估的主要目的是优化或选择航空保障装备方案。为实现这一目标，需要对多个备选方案进行多轮比较分析，不断修改完善方案。

(2) 评估指标具有系统性。规划阶段航空保障装备方案效能评估不仅应关注航空保障装备的利用率、满足率、延误时间等资源指标，更应注重航空保障装备方案对航空装备系统任务完成、装备完好、保障费用等方面系统级指标的影响。

(3) 评估结果具有不确定性。规划阶段航空保障装备方案效能评估需要建立航空装备作战训练运用、维修保障活动、保障资源使用等模型，需要获取航空装备与航空保障装备的 RMS 数据；然而规划阶段，特别是立项论证阶段，模型数据主要是基于相似系统获取的，相关模型粒度会相对较粗，相关使用数据会相对缺乏，导致模型数据具有一定的不确定性，

进而使评估结果产生一定的不确定性。

(4) 评估验证具有滞后性。由于规划阶段形成的航空保障装备方案，其真实的效能需要经过长时间使用才能显现出来、通过外场数据分析才能准确计算。因此，要验证规划阶段航空保障装备方案效能评估是否科学，需要经历较长时间。

基于规划阶段航空保障装备方案效能评估的上述特点，以及建模仿真技术所具备的短时间内多次重复模拟方案实施过程的优势，使规划阶段航空保障装备方案效能仿真评估可以成为较为理想的解决思路。

6.1.2 规划阶段航空保障装备方案效能仿真评估流程

规划阶段航空保障装备方案效能仿真评估的目的，是模拟航空装备、航空保障装备在一定的作战训练使用剖面、使用与维修保障方案下的运用过程，进而分析航空保障装备方案对航空装备系统相关保障效能指标的影响，然后根据目标约束或要求进行航空保障装备方案的优化或决策。规划阶段航空保障装备方案效能仿真评估的一般流程如图 6-1 所示。

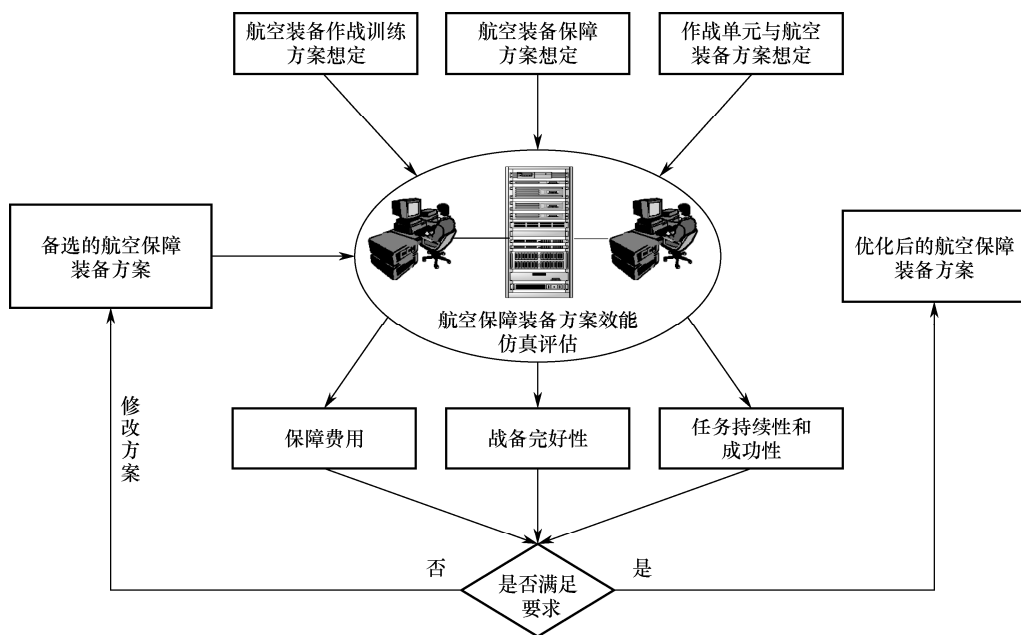


图 6-1 规划阶段航空保障装备方案效能仿真评估的一般流程

图 6-1 中航空保障装备方案效能仿真评估的输入为航空装备作战训练方案、作战单元与航空装备方案、航空装备保障方案及备选的航空保障装备方案；输出为优化后的航空保障装备方案及航空装备系统任务持续性和成功性、战备完好性、保障费用等指标。

6.2 规划阶段航空保障装备方案效能仿真评估模型

规划阶段航空保障装备方案效能仿真评估模型，是建立在航空装备作战训练任务、使用与维修保障过程，以及航空装备、保障系统抽象的基础上，涉及作战训练任务、装备功能结构、保障组织、保障资源、保障活动和保障目标输出等一系列模型。相关模型及其关系如图 6-2 所示。需要说明的是，在航空装备全寿命周期的不同阶段，受数据获取难度或仿真目的等因素的影响，仿真评估模型的粒度可以粗细不一致。

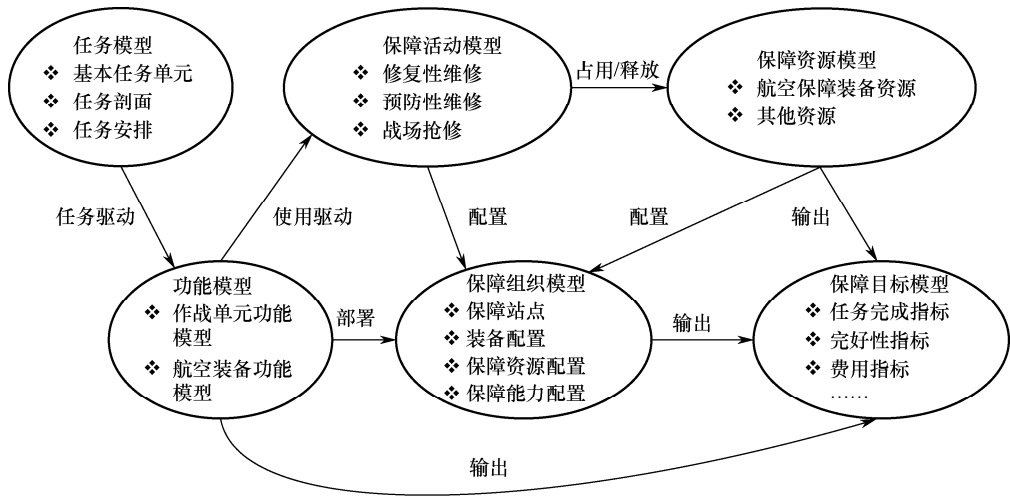


图 6-2 航空保障装备方案效能仿真评估模型及其关系

6.2.1 任务模型

任务模型反映基本任务单元中航空装备在一段时间历程内的任务安排，以作战训练任务想定为建模对象，抽象描述航空装备在作战、训练中的运用方式，包括任务属性、任务触发、任务时序、任务执行环境、任务成败依据、任务间的逻辑关系等要素。

1. 一般任务过程

航空装备作战训练任务的一般过程包括确定任务航空装备、飞行前机务准备、执行飞行任务、飞行后检查或再次出动机务准备、待命等阶段，如图 6-3 所示。

(1) 确定任务航空装备阶段。确定任务航空装备阶段主要是为作战训练任务挑选任务航空装备。确定任务航空装备的方法一般根据飞机完好情况和梯次使用安排进行确定。
①航空装备完好情况。由于随着航空装备执行飞行任务的累积，其寿命不断消耗，其可用情况也发生了改变；而只有航空装备处于完好或满足任务要求的状态时，才能执行飞行任务。
②梯次使用安排。在航空装备的使用过程中，考虑保持作战单元战备完好性要求

及修理能力等问题，需要将航空装备剩余寿命拉开并保持一定的梯次，以避免航空装备集中到达翻修间隔或总寿命。

(2) 飞行前机务准备阶段。主要进行飞行前检查、补足燃料、滑油、特种液体和气体、装订数据、挂载弹药等工作。如果在此阶段发生故障或损伤导致航空装备数量在任务启动时未达到要求，则任务会被延迟；如果在可接受的延迟时间内仍未达到要求，则任务失败。

(3) 执行飞行任务阶段。任务启动后，进入作战训练任务执行阶段。当航空装备在任务执行时发生严重故障、战伤无法继续执行任务时，则必须返回保障站点进行维修。在任务执行过程中，航空装备数量会因为严重故障或战伤、战损而减少，当航空装备数量小于任务定义的最小数量时，会造成任务失败。

(4) 飞行后检查或再次出动机务准备阶段。任务执行完成后，根据任务要求，进入飞行后检查或再次出动机务准备阶段。如发现故障或战伤，航空装备将被送到相关站点进行维修，任务结束后没有发生故障的航空装备或已修理好的航空装备将等待执行下一个任务。在航空装备处于待命状态时，可进行固定时间间隔触发的预防性维修。

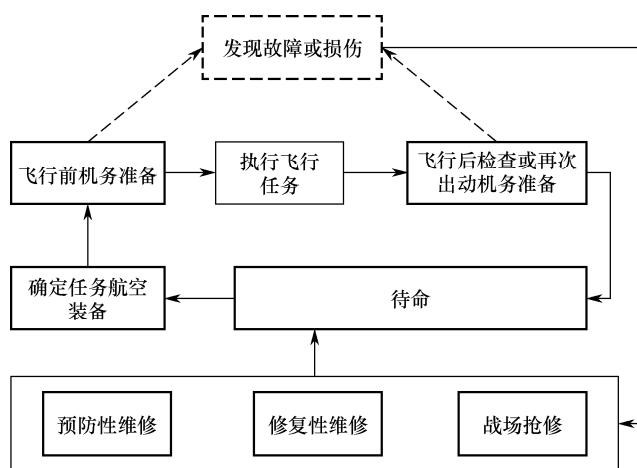


图 6-3 航空装备作战训练任务的一般过程

2. 任务模型的层次结构

任务模型通过基本任务单元、任务剖面（任务序列）和任务安排 3 个层次对航空装备任务进行建模。

(1) 基本任务单元。基本任务单元是一个任务中不可分解的最小任务阶段，是构成一个完整的任务剖面的基本组成元素，是仿真活动的主要驱动引擎。在基本任务单元中，必须明确任务成功的依据，如任务需要的航空装备数量和最小航空装备数量、任务成功时间点等要素。在任务成功时间点之前，航空装备数量小于任务需要的航空装备最小数量，则此基本任务单元也视为失败。

(2) 任务剖面。任务剖面可以理解为任务序列，它是由一系列基本任务单元按照任务

执行时间次序排列组成的，是一个最小的完整的可执行任务。任务剖面可相互嵌套，形成任务执行序列；每个任务序列都是按时间以升序方式排列的，仿真始终以此为驱动，一步一步地向前推进。

（3）任务安排。任务安排是作战单元在一段时间周期里需要具体执行的一个完整的典型任务序列。

3. 任务模型数据描述

航空装备任务模型所需要的数据，可以用基本任务单元数据表、任务剖面数据表、任务安排数据表进行描述，分别如表 6-1～表 6-3 所示。

表 6-1 基本任务单元数据表

| 基本任务 单元名称 | 任务持续 时间 | 允许延误 时间 | 任务成功 时间点 | 起飞滑行 时间比例 | 返航时间 比例 | 要求装备 出动数量 | 要求装备 出动最少数量 |
|--------------|------------|------------|-------------|--------------|------------|--------------|----------------|
| | | | | | | | |

表 6-2 任务剖面数据表

| 任务剖面 名称 | 任务子剖面 名称 | 任务子剖面 数量 | 任务剖面 执行模式 | 任务剖面 启动时间 | 任务剖面 启动间隔时间 |
|------------|-------------|-------------|--------------|--------------|----------------|
| | | | | | |

表 6-3 任务安排数据表

| 作战单元名称 | 任务剖面名称 | 任务部署站点 |
|--------|--------|--------|
| | | |

6.2.2 功能模型

航空装备功能模型是描述作战单元、作战单元内航空装备的组成及组成单元 RMS 特性的模型，包括作战单元内航空装备部署、航空装备的功能层次结构及各功能单元 RMS 特性。

1. 航空装备功能模型

- （1）作战单元。作战单元包括作战单元内航空装备的部署、型号和配置数量等信息。
- （2）航空装备的功能层次结构。从功能结构上看，航空装备可以看成是由一系列系统、子系统、单元和模块组成的，如图 6-4 所示。一般来说，航空装备功能结构的层次数目没有限制，但在装备保障领域为了研究方便，外场一般将航空装备功能结构分解到外场可更换单元（LRU）或外场可更换模块（LRM）；内场一般将航空装备功能结构分解到内场可更换单元（SRU）或内场可更换模块（SRM）。产品界定为单元或模块的分类并不总是明确的，一个产品在某种系统中可能是 LRU，但在另一种系统中又可能是 SRU。另外，单元和模块是可以嵌套的，如 LRU 中包含了若干个 SRU。

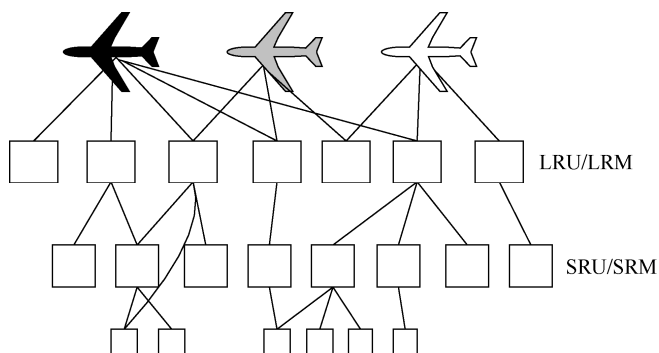


图 6-4 航空装备的功能层次结构

(3) 单元和模块的属性。无论对于单元或模块，产品可能的可更换、可维修的性质包括以下 3 点。①可更换、可维修的单元或模块。②可维修、不可更换的单元或模块。③不可维修、可更换的单元或模块。除可更换、可维修的性质外，单元或模块还应明确其 RMS 特性、费用属性等信息。

2. 功能模型的数据描述

航空装备功能模型需要的数据可以用作战单元数据表、航空装备产品数据表、航空装备功能结构数据表描述，分别如表 6-4～表 6-6 所示。

表 6-4 作战单元数据表

| 作战单元名称 | 航空装备名称 | 航空装备配置数量 | 航空装备利用率 |
|--------|--------|----------|---------|
| | | | |

表 6-5 航空装备产品数据表

| 单元/模块名称 | 单元/模块类型 | 可靠性指标 | 任务可靠性指标 | 购置费用 |
|---------|---------|-------|---------|------|
| | | | | |

表 6-6 航空装备功能结构数据表

| 单元/模块名称 | 父单元/模块名称 | 父单元包含产品数量 |
|---------|----------|-----------|
| | | |

6.2.3 活动模型

航空装备保障活动模型主要描述航空装备作战使用过程中的各类保障作业活动，包括航空装备修复性维修和预防性维修的维修对象、维修地点、维修（间隔）时间及维修作业活动花费的资源和维修费用等要素。

1. 修复性维修模型

修复性维修模型主要描述修复性维修类型、维修站点、维修时间等信息。修复性维修通过更换部件或者直接维修的方式对航空装备的损伤或故障进行修复。

2. 预防性维修模型

预防性维修模型主要描述预防性维修类型、预防性维修间隔时间、预防性维修时间、维修站点等信息。预防性维修的间隔时间可以是日历时间，也可以是使用时间或使用次数。预防性维修的对象既可以针对部件，也可以针对系统甚至整机。

3. 保障资源消耗模型

修复性或预防性维修需要占用维修人员、器材备件和保障装备等资源。维修活动结束后，维修人员和保障装备等占用性资源将得到释放；而更换下来的可修复部件将送到预先设定的保障站点进行维修，不可修复部件将报废。如果在维修作业活动中，相关的保障资源缺乏，则维修活动将处于等待状态，航空装备将处于不可用状态。

4. 保障活动模型的数据描述

航空装备保障活动模型需要的数据可以用修复性维修（换件维修）数据表、修复性维修（产品维修）数据表、预防性维修数据表、保障资源消耗数据表进行描述，分别如表 6-7～表 6-10 所示。

表 6-7 修复性维修（换件维修）数据表

| 修复性维修作业名称 | 父产品名称 | 子产品名称 | 维修站点 | 更换时间 |
|-----------|-------|-------|------|------|
| | | | | |

表 6-8 修复性维修（产品维修）数据表

| 修复性 维修对象 | 维修 站点 | 直接维修 因子 | 直接维修 时间 | 子产品更 换因子 | 子产品 更换时间 | 维修 费用 | 直接维修 作业名称 | 子产品更换 作业名称 |
|-------------|----------|------------|------------|-------------|-------------|----------|--------------|---------------|
| | | | | | | | | |

表 6-9 预防性维修数据表

| 预防性维修 作业名称 | 预防性 维修对象 | 预防性 维修站点 | 预防性 维修时间 | 预防性维修 间隔时间 | 预防性 维修间隔 时间单位 | 预防性维修 提前开始 时间比例 | 预防性维修 延迟开始 时间比例 | 维修 费用 |
|---------------|-------------|-------------|-------------|---------------|---------------------|-----------------------|-----------------------|----------|
| | | | | | | | | |

表 6-10 保障资源消耗数据表

| 维修作业名称 | 维修资源名称 | 维修资源数量 |
|--------|--------|--------|
| | | |

6.2.4 资源模型

航空装备保障资源模型主要用于对航空装备保障系统中的各类保障资源进行建模，包括保障资源类型、保障资源配置站点及保障资源实体的属性。常见的航空装备保障资源包括保

障人员、备件、保障装备等。需要说明的是，根据仿真目的的不同，可重点对需要关注的保障资源进行建模，其他资源可以概略性地进行建模。例如，在本章的航空保障装备方案效能仿真评估中，重点是对航空保障装备进行建模，人员、备件等保障资源可以概略性地进行建模。以航空保障装备为例，对航空装备保障资源的数据描述进行说明，如表 6-11 所示。

表 6-11 航空保障装备资源数据表

| 航空保障装备名称 | 保障站点 | 航空保障装备 配置数量 | 航空保障装备 平均故障间隔时间 | 航空保障装备 平均修复时间 |
|----------|------|----------------|--------------------|------------------|
| | | | | |

6.2.5 组织模型

航空装备保障组织模型用于描述作战单元所在的保障系统组织结构，主要反映航空保障组织中站点的构成及其支援关系，确定各保障站点的保障级别、类型。

1. 保障级别

航空装备保障级别是指对航空装备及其系统、部件和机件的维修深度、范围所划分的级别。根据国内外航空装备保障现状，航空装备保障级别一般划分为二级或三级，二级是指基层级保障和基地级保障，三级是指基层级保障、中继级保障和基地级保障。对于不同的保障级别，航空装备保障能力也不相同，级别越高，保障能力越强。

2. 保障站点

保障站点（维修站点、器材仓储站点）都赋予了相应的保障级别、保障站点类型。保障站点类型一般包括使用现场、维修站、备件库和基地 4 类。使用现场一般是指不具备维修、器材保障能力的站点；维修站一般是指具备维修能力但不具备器材保障能力的站点；备件库一般是指具备器材保障能力但不具备维修能力的站点。基地一般是同时具备维修和器材保障能力的站点。对于航空保障装备而言，由于其主要用途是服务于使用和维修保障工作的，因此除备件库以外的其他保障站点类型都可以配置航空保障装备。

3. 保障站点支援关系

保障站点之间存在相互支援的关系。例如，低保障级别站点的故障件送到高保障级别站点维修，维修完成后再返回低级别保障站点。同级别保障站点之间可能存在器材备件、保障装备共享等支援关系。

4. 保障组织模型的数据描述

航空装备保障组织模型需要的数据可以用保障级别能力数据表、保障站点数据表、保障站点支援关系数据表进行描述，分别如表 6-12～表 6-14 所示。

表 6-12 保障级别能力数据表

| 保障级别 | 航空保障装备利用率 | 航空保障装备满足率 | 航空保障装备 平均延误时间 | 其他保障资源 指标要求 |
|------|-----------|-----------|------------------|----------------|
| | | | | |

表 6-13 保障站点数据表

| 保障站点名称 | 保障级别 | 保障站点类型 |
|--------|------|--------|
| | | |

表 6-14 保障站点支援关系数据表

| 保障站点名称 | 上级保障 站点名称 | 站点间向上 运输时间 | 站点间向下 运输时间 | 同级保障 站点名称 | 同级保障站点 运输时间 |
|--------|--------------|---------------|---------------|--------------|----------------|
| | | | | | |

6.2.6 目标模型

航空装备保障目标可以从任务完成指标、装备完好指标、保障资源指标、费用指标等方面进行分析。

（1）任务完成指标。任务完成指标包括任务持续时间、任务总时间、任务总次数、任务成功率、平均任务延迟时间等。

（2）装备完好指标。装备完好指标通常包括装备完好率、装备可用数量、使用可用度指标等。

（3）保障资源指标。以航空保障装备为例，保障资源指标通常包括航空保障装备满足率、利用率、平均保障延误时间。

（4）费用指标。以航空保障装备为例，费用指标通常包括航空保障装备的购置费、大修费、小修费等。

6.3 规划阶段航空保障装备方案效能仿真评估算法策略

6.3.1 仿真评估流程控制算法策略

仿真评估流程控制算法策略决定了仿真过程中总体控制逻辑。规划阶段航空保障装备方案效能仿真评估的时钟推进主要是基于离散事件驱动的。规划阶段航空保障装备方案效能仿真评估涉及作战训练任务产生、任务分配、任务前准备、任务执行、任务后检查、故障/损伤、预防性/修复性维修、航空保障装备占用/释放等离散事件，从而形成事件队列。

基于离散事件驱动的航空保障装备方案效能仿真评估流程主要由仿真输入、事件队列处理和仿真输出 3 部分组成，如图 6-5 所示。仿真输入模块负责提供仿真评估需要的各项数据；事件队列处理模块负责事件队列管理控制、事件处理，并负责进行仿真时钟推进；仿真输出模块负责计算并统计各项指标。

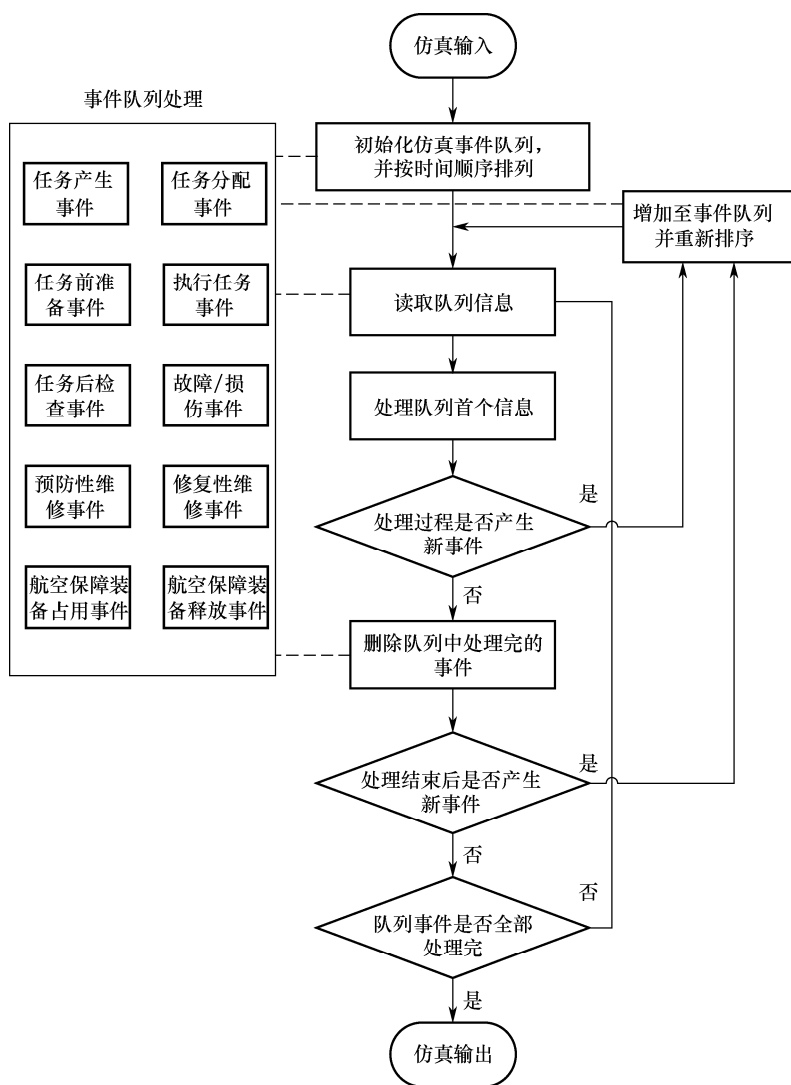


图 6-5 基于离散事件驱动的航空保障装备方案效能仿真评估流程

在事件队列处理模块中，部分事件是预先设定产生的，另外一些事件是事件执行过程中新产生的，因此事件队列是一直处于动态变化中的。例如，执行任务事件会激励预防性维修事件的发生；故障/损伤事件会激励修复性维修事件的发生；修复性/预防性维修事件又会激励航空保障装备占用/释放事件的发生。而仿真时钟始终推进到事件队列中的第一个事件，当有新事件发生或旧事件删除时，须按时间顺序对事件队列进行重新排序。

6.3.2 任务过程逻辑算法策略

任务过程逻辑算法策略决定了事件队列中任务事件的处理逻辑。航空装备任务过程一般包括任务前准备、执行任务、任务后检查等阶段。在任务前准备、任务后检查阶段都需要用到航空保障装备，如果在这个过程中发生故障，还要进行修复性维修活动。任务完成后，要判断是否满足预防性维修的条件，如果满足还要进行预防性维修。任务执行成功标准需要满足两点：①在任务前准备阶段，没有发生故障，或发生故障但在规定允许时间内得到排除。②在任务执行过程中，没有发生影响任务或安全的严重故障；或者发生严重故障，但执行任务的时间已超过预定值，可安全返航或顺利完成任务。航空装备任务过程逻辑算法策略如图 6-6 所示。

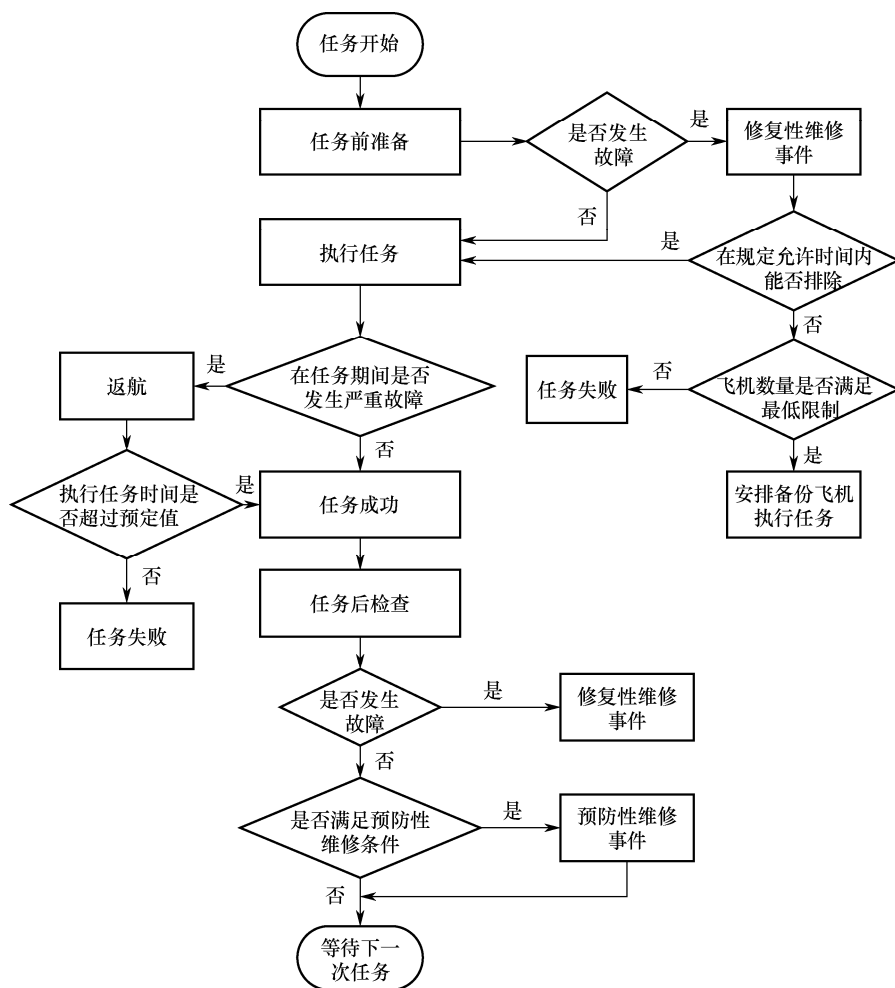


图 6-6 航空装备任务过程逻辑算法策略

6.3.3 保障过程逻辑算法策略

保障过程逻辑算法策略决定了事件队列中保障活动事件的处理逻辑。航空装备保障过程一般包括修复性/预防性维修请求、资源申请、资源到达、保障活动、保障结束、保障资源释放等环节。其中，在规划阶段航空保障装备方案效能仿真评估中，航空装备保障过程可以简化备件、人员等因素，只考虑航空保障装备资源。修复性/预防性维修（含任务前、任务后保障工作）一般需要航空保障装备的资源支持，如果保障资源品种和数量不满足需求，则处于维修等待；如果满足需求，则进行维修活动。维修活动结束后，航空装备保障资源则得到释放。航空装备保障过程算法逻辑策略如图 6-7 所示。

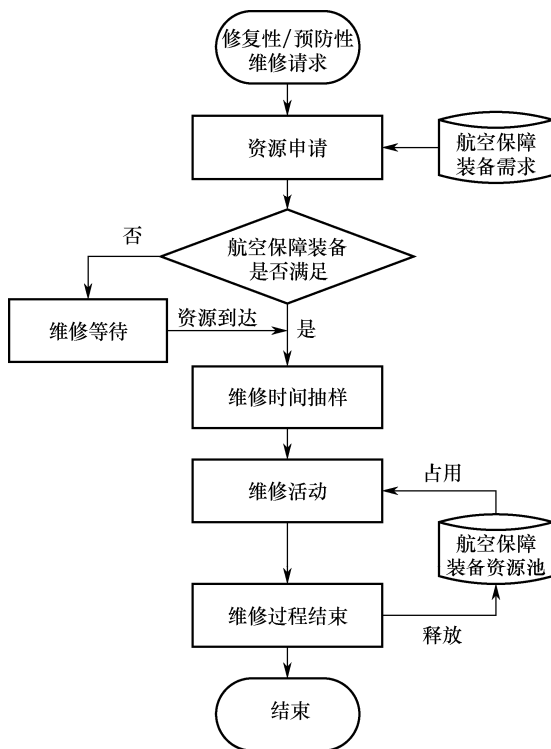


图 6-7 航空装备保障过程逻辑算法策略

另外，在具体的航空装备使用与维修保障活动中，不同类型航空保障装备受安全、工作空间和使用流程等因素的影响，多个保障装备使用的工作时序可能是并行的，也可能是串行的，甚至是网络连接关系的。其中，并行关系包括完全并行关系、并发并行关系、交叉并行关系；串行关系包括连续串行关系、有间隔串行关系；网络连接关系是串行、并行关系的混合。航空保障装备使用的时序逻辑关系如图 6-8 所示。

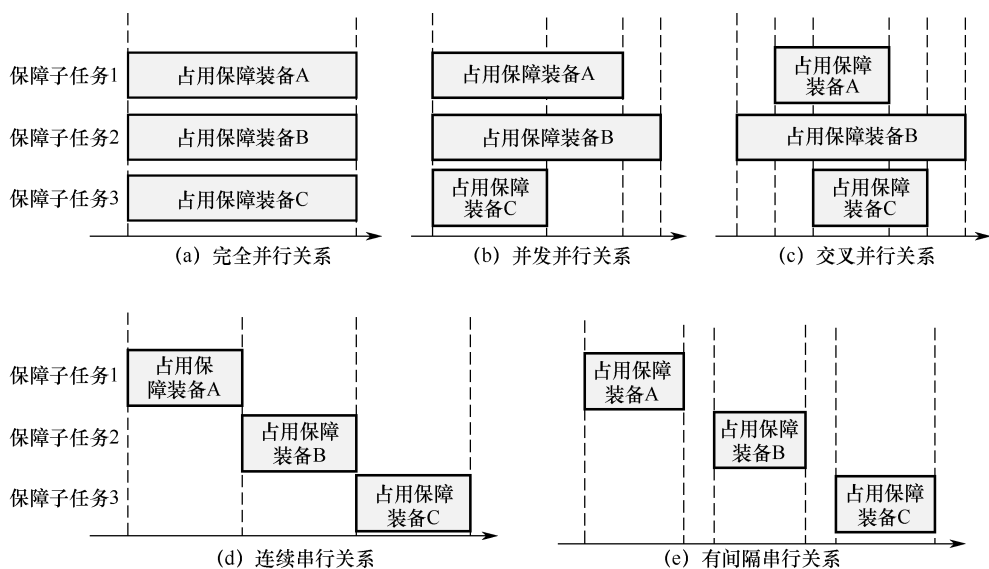


图 6-8 航空保障装备使用的时序逻辑关系

6.4 规划阶段航空保障装备方案效能仿真评估模型的确认与验证

对仿真评估模型的确认与验证 (Validation & Verification, V&V) 是确保仿真结果有效、可信的重要环节。

6.4.1 仿真评估模型确认

对仿真评估模型的确认是研究仿真评估模型的有效性问题的，即模型与所反映的客观世界间的相似程度。由于航空保障装备方案效能仿真评估是一项与研制方、订购方和使用方关系密切的工作，宜采用“面确认”(Face Validation)方法，邀请不同利益方的专家采用研讨形式确认概念模型的正确性，同时邀请离散事件仿真方面的专家通过对模型的代码走查及仿真过程动画的方式，对以下内容进行确认：

- (1) 基本假设。
- (2) 仿真模型逻辑流向。
- (3) 模型中包含的航空装备任务和保障过程。

6.4.2 仿真评估模型验证

对仿真评估模型的验证是研究仿真评估模型的可信性问题，即模型的计算机实现过程

及仿真结果的正确性，仿真评估模型宜采用以下 3 种验证方法。

1. 代码走查

代码走查是一种静态验证方法，由设计人员对仿真评估系统（由仿真评估模型的计算机实现）的各段代码进行走查，发现设计缺陷和错误。如果仿真评估模型是基于专用的保障仿真平台开发的，代码走查可以只关注模型数据的可信性。如果仿真评估模型是基于通用的、模块化的仿真平台二次开发的，由于部分离散事件通用模块已经经过验证，具有可重复性，为了减少开发周期、降低成本，可只对以下内容进行代码走查。

- (1) 航空装备任务产生算法。
- (2) 航空装备任务分配模块算法。
- (3) 航空保障装备调度算法。
- (4) 故障产生与检测算法。
- (5) 任务结束后的航空装备寿命累积。

2. 模型分段验证

模型分段验证是一种动态验证方法，提取仿真评估系统中的子模块，分别构建输入/输出模块，采用简化的输入集（简化标准为可解析分析出输出结果），验证子模块的正确性。

3. 数据集验证

数据集验证也是一种动态验证方法，通过对仿真评估系统构建不同的输入集合，验证仿真评估结果的正确性。输入数据集按照由简单到复杂的原则构建，由包含单航空装备、单系统、单任务、不考虑资源约束的最简单的输入集，到包含多航空装备、多系统、多任务、考虑资源约束的现实验证对象。对于简单的输入数据集，可以通过解析计算预计出仿真结果，与实际仿真结果进行比较，从而验证模型的可信性；对于复杂的输入数据集，难以解析计算出预计结果，对仿真结论的变化趋势，以及部分统计特征则是可预计的，通过这些可预计的结果与实际仿真结果之间的比较验证模型的可信性。

6.5 规划阶段航空保障装备方案效能仿真评估案例

6.5.1 案例简介

某多机种基地部署有 A、B 两型飞机，由于论证、设计等原因，A、B 两型飞机配套的航空保障装备大多不能实现多功能化、多机种化，导致该多机种基地航空保障装备品种杂、数量多，多机种保障能力和机动保障能力受到制约。因此，为成体系提高航空保障装备的效能，考虑 A、B 两型飞机混编配置越来越普遍的现状，相关业务部门决定组织航空保障

装备多机种通用化、多专业通用化论证，规划了航空保障装备多专业通用化、多机种通用化、多机种多专业通用化 3 种优化的备选方案。为简化方案，做如下假定，如表 6-15 所示。

表 6-15 航空保障装备方案说明

| 方案名称 | 方案说明 | 备注 |
|-----------------|---|--------------------------------|
| 方案 1（原方案） | A、B 两型飞机航空保障装备不能实现多专业通用化、多机种通用化 | A、B 两型飞机各包括机械、军械、特设、航电 4 个维修专业 |
| 方案 2（多专业通用化） | A、B 两型飞机航空保障装备不能实现多机种通用化，但 A、B 两型飞机各自机械专业、特设专业的航空保障装备能实现多专业通用化 | |
| 方案 3（多机种通用化） | A、B 两型飞机航空保障装备不能实现多专业通用化，但 4 个维修专业对应的航空保障装备能实现 A、B 两型飞机保障的通用化 | |
| 方案 4（多机种多专业通用化） | A、B 两型飞机机械专业、特设专业的航空保障装备能实现多机种通用化，且 4 个维修专业对应的航空保障装备在 A、B 两型飞机能实现多专业通用化 | |

由于受经费、时间成本的制约，表 6-15 中规划的航空保障装备方案不能一一进行外场验证，拟采用仿真方法对比分析上述 3 种方案和原方案在效能方面的差异，从而实现航空保障装备方案优选的目的，该案例的研究思路如图 6-9 所示。

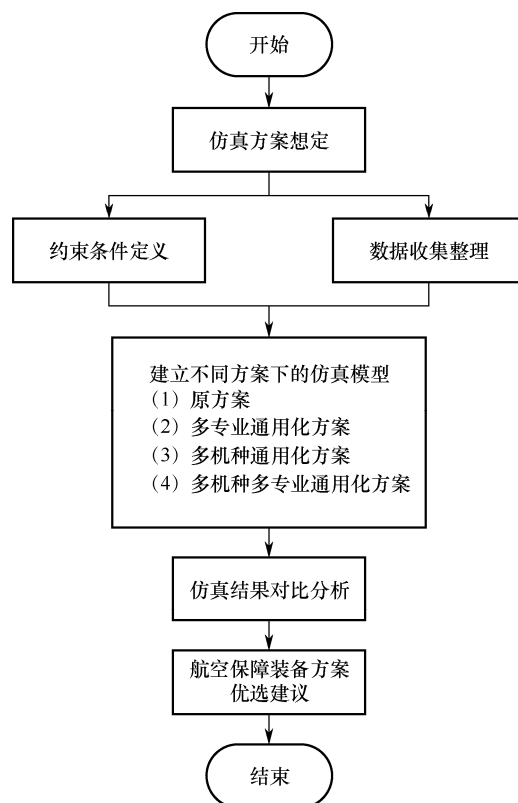


图 6-9 案例研究思路

6.5.2 仿真平台工具

规划阶段航空保障装备方案效能仿真评估案例选用的仿真平台工具是由瑞典的系统与后勤工程公司（SYSTECON）开发的 SIMLOX（系统运行与维修保障仿真平台）。

SIMLOX 支持对战备完好性和可用性的定量分析，可以用来模拟并分析复杂的使用和维修保障方案。该平台基于蒙特卡洛仿真模型和排队论法，能够在装备寿命周期各个阶段进行效能评估，以辅助工程人员进行指标论证、比较保障备选方案、分析当前保障系统能否为装备提供有效的使用与维修保障、确定保障系统的研制要求等。SIMLOX 相关仿真模型之间的关系如图 6-10 所示。

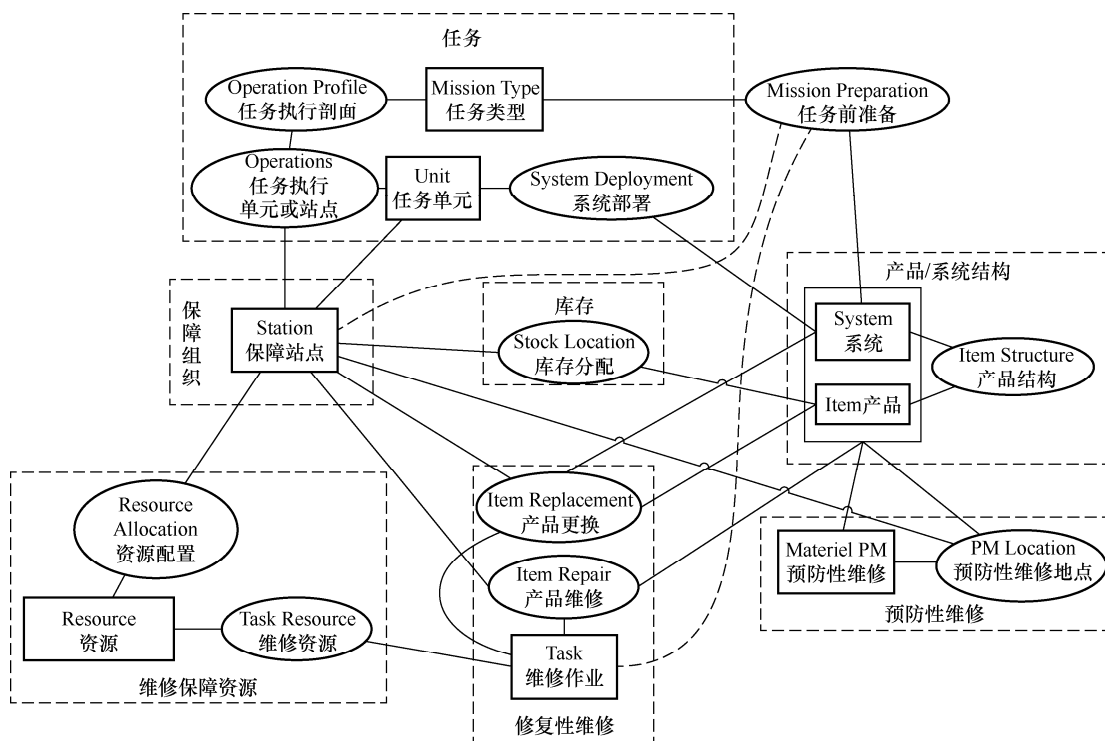


图 6-10 SIMLOX 相关仿真模型之间的关系

该仿真平台具有以下几个特点。

1. 采用离散事件仿真原理

采用动态蒙特卡洛仿真模型，对装备实际运行环境和保障体系进行仿真，以实现在装备正式运行前发现问题和缺陷、瓶颈，并进行更正。

2. 以装备建模、保障系统建模及任务建模为核心

装备建模是对装备本身的描述。SIMLOX 模型对装备的建模深度没有限制，可实现到零部件级的建模，也可根据实际情况进行调整。对装备进行建模时，要求对其各组成部件

的可靠性、维修性参数进行描述,通过所给数据模拟各组成部件工作、故障、维修等活动。

对保障系统的建模主要包括对保障组织、使用与维修活动等的建模。SIMLOX 模型把保障组织视为通过运输关联起来的一系列站点,支持自定义维修级别并可考虑横向保障。同时可在每个站点对部署的保障资源进行建模。通常考虑的保障资源类型包括人力、保障设备、保障设施等。对装备使用与维修活动进行建模需要对装备中可能发生的使用与维修活动进行描述,如故障件与维修机构之间、故障件与供应机构之间的交互行为等。

任务建模对仿真结果非常重要。在 SIMLOX 模型中,任务建模以装备的使用方案为描述对象,构建合理的任务剖面。

3. 支持复合型系统的建模

在 SIMLOX 模型中,不仅可对单一的装备进行建模,还支持对由多种不同装备构成的复合型系统进行建模,综合考虑这些装备的保障问题。

4. 仿真效能输出指标类型多样

在 SIMLOX 模型中,系统效能指标是通过收集仿真中顺序产生的一系列仿真结果得来的。SIMLOX 模型能够输出关于任务、库存、资源等方面的结果,用于保障方案评估。通过仿真来评价保障系统与装备的匹配情况及各保障要素之间的协调情况,判断所确定的保障资源和保障方案能否满足使用要求。

6.5.3 仿真基本想定

1. 基本约束

案例中的航空保障装备方案效能仿真评估仅考虑基层作战单元航空保障装备对效能的影响,不考虑供应保障、计算机资源、人力资源、设施、包装运输等影响,为此做如下约束。

(1) 只考虑基层级的外场保障站点。基层级的外场保障站点负责航空装备的使用和维修,配置相应的航空保障装备,基层级修理车间及更高级别的保障站点暂不考虑。

(2) 只考虑航空保障装备资源。保障资源仅分析航空保障装备,其他资源默认均满足要求。

(3) 不考虑运输工作。仿真过程中不涉及运输工作,如须运输可将运输时间设置为 0。

(4) 所有修复性维修工作是通过换件完成的。

2. 作战单元、装备、任务想定

某多机种基地有 A、B 两型飞机各 8 架。根据训练计划,每周一至周三执行单机、双机编队飞行任务,每周四执行四机编队飞行任务,每周五执行六机编队飞行任务,每周六、周日休息,每年飞行 50 周,共执行 3 年;编队所需 A、B 两型飞机随机指派。作战单元航空装备的任务想定如表 6-16 所示。

表 6-16 作战单元航空装备的任务想定

| 训练任务 | 飞机数量（架） | 所需最少数量（架） | 飞行小时（h） | 任务说明 |
|------|---------|-----------|---------|------------------------------|
| 单机飞行 | 1 | 1 | 1.5 | 周一至周三：每天 8 个单机飞行任务，5 个双机飞行任务 |
| 双机飞行 | 2 | 2 | 1.5 | |
| 四机飞行 | 4 | 3 | 1.5 | 周四：每天 5 个四机飞行任务 |
| 六机飞行 | 6 | 5 | 1.5 | 周五：每天 3 个六机飞行任务 |

根据上述任务想定，该训练计划的总任务强度为：7050 次任务、10575 任务小时、13800 飞行架次、20700 飞行小时。

假定 A、B 两型飞机均由机械专业系统（S1）、军械专业系统（S2）、特设专业系统（S3）、航电专业系统（S4）4 部分组成；飞机组成及其可靠性数据如表 6-17 所示。

表 6-17 飞机组成及其可靠性数据

| 飞机型号 | 系统 | 故障率（1/h） | 严重故障比例 | 产品数量 | 备注 |
|------|------|----------|--------|------|--------|
| A | A_S1 | 0.05 | 0.25 | 1 | 机械专业系统 |
| | A_S2 | 0.0125 | 0.25 | 1 | 军械专业系统 |
| | A_S3 | 0.0375 | 0.25 | 1 | 特设专业系统 |
| | A_S4 | 0.05 | 0.25 | 1 | 航电专业系统 |
| B | B_S1 | 0.05 | 0.25 | 1 | 机械专业系统 |
| | B_S2 | 0.0125 | 0.25 | 1 | 军械专业系统 |
| | B_S3 | 0.0375 | 0.25 | 1 | 特设专业系统 |
| | B_S4 | 0.05 | 0.25 | 1 | 航电专业系统 |

3. 航空保障装备方案想定

在任务周期内，航空保障设备使用一段时间后会出现故障，故障后需要维修并占用时间。假定所有类型航空保障装备的平均故障间隔时间(MTBF)为 30h, 平均修复时间(MTTR)为 3h。下面给出 4 种不同的航空保障装备方案想定。

1) 方案 1（原方案，不考虑多专业通用、多机种通用）

作战单元内航空保障装备配置情况如表 6-18 所示。

表 6-18 作战单元内航空保障装备配置情况（方案 1）

| 作战单元 | 航空保障装备名称 | 数量 | 保障对象 |
|---------|-------------|----|-------------|
| ××多机种基地 | A 型飞机机械保障装备 | 1 | A 型飞机机械专业系统 |
| | A 型飞机军械保障装备 | 1 | A 型飞机军械专业系统 |
| | A 型飞机特设保障装备 | 1 | A 型飞机特设专业系统 |
| | A 型飞机航电保障装备 | 1 | A 型飞机航电专业系统 |
| | B 型飞机机械保障装备 | 1 | B 型飞机机械专业系统 |
| | B 型飞机军械保障装备 | 1 | B 型飞机军械专业系统 |
| | B 型飞机特设保障装备 | 1 | B 型飞机特设专业系统 |
| | B 型飞机航电保障装备 | 1 | B 型飞机航电专业系统 |

如 A、B 两型飞机某专业系统出现故障后,采用更换 LRU 的方式维修,排故及更换时间为 3h,其中只有 1h 会使用航空保障装备。飞机每次执行任务前需要 1h 的任务准备时间,每次任务后需要执行 1h 的任务后检查,其中只有 0.5h 会使用航空保障装备;每飞行 25h 在外场进行 8h 的周期性工作,其中只有 1.5h 会使用航空保障装备;每飞行 300h 返回修理厂进行 168h 的定检任务,暂不考虑修理厂保障装备。A、B 两型飞机相关保障活动占用航空保障装备情况如表 6-19 所示。

表 6-19 A、B 两型飞机相关保障活动占用航空保障装备情况(方案 1)

| 保障活动名称 | 保障活动时间(h) | 所需航空保障装备 | 占用航空保障装备时间(h) |
|--------------------------|-----------|---------------------------------------|---------------|
| A_S1 维修(A 型飞机机械专业系统换件维修) | 3 | 1 个 A 型飞机机械保障装备 | 1 |
| A_S2 维修(A 型飞机军械专业系统换件维修) | 3 | 1 个 A 型飞机军械保障装备 | 1 |
| A_S3 维修(A 型飞机特设专业系统换件维修) | 3 | 1 个 A 型飞机特设保障装备 | 1 |
| A_S4 维修(A 型飞机航电专业系统换件维修) | 3 | 1 个 A 型飞机航电保障装备 | 1 |
| B_S1 维修(B 型飞机机械专业系统换件维修) | 3 | 1 个 B 型飞机机械保障装备 | 1 |
| B_S2 维修(B 型飞机军械专业系统换件维修) | 3 | 1 个 B 型飞机军械保障装备 | 1 |
| B_S3 维修(B 型飞机特设专业系统换件维修) | 3 | 1 个 B 型飞机特设保障装备 | 1 |
| B_S4 维修(B 型飞机航电专业系统换件维修) | 3 | 1 个 B 型飞机航电保障装备 | 1 |
| A 型飞机任务前准备、任务后检查 | 1 | A 型飞机机械保障装备、军械保障装备、特设保障装备、航电保障装备各 1 个 | 0.5 |
| A 型飞机周期性工作(25 飞行小时) | 8 | A 型飞机机械保障装备、军械保障装备、特设保障装备、航电保障装备各 1 个 | 1.5 |
| B 型飞机任务前准备、任务后检查 | 1 | B 型飞机机械保障装备、军械保障装备、特设保障装备、航电保障装备各 1 个 | 0.5 |
| B 型飞机周期性工作(25 飞行小时) | 8 | B 型飞机机械保障装备、军械保障装备、特设保障装备、航电保障装备各 1 个 | 1.5 |

2) 方案 2(多专业通用化)

在方案 2 中,同型飞机机械、特设专业系统航空保障装备通用化(后面统称为机电保障装备),即 A 型飞机机电保障装备负责 A 型飞机的机械专业系统和特设专业系统的维修保障任务。作战单元内航空保障装备配置情况如表 6-20 所示。

表 6-20 作战单元内航空保障装备配置情况(方案 2)

| 作战单元 | 航空保障装备名称 | 数量 | 保障对象 |
|---------|-------------|----|----------------|
| ××多机种基地 | A 型飞机机电保障装备 | 2 | A 型飞机机械和特设专业系统 |
| | A 型飞机军械保障装备 | 1 | A 型飞机军械专业系统 |
| | A 型飞机航电保障装备 | 1 | A 型飞机航电专业系统 |
| | B 型飞机机械保障装备 | 2 | B 型飞机机械和特设专业系统 |
| | B 型飞机军械保障装备 | 1 | B 型飞机军械专业系统 |
| | B 型飞机航电保障装备 | 1 | B 型飞机航电专业系统 |

A、B 两型飞机相关保障活动占用航空保障装备情况如表 6-21 所示。

表 6-21 A、B 两型飞机相关保障活动占用航空保障装备情况（方案 2）

| 保障活动名称 | 保障活动时间（h） | 占用 A、B 两型机电保障装备时间(h) |
|---------------------------------|-----------|----------------------|
| A_S1 维修、A_S3 维修、B_S1 维修、B_S3 维修 | 3 | 1 |
| A、B 型飞机任务前准备、任务后检查 | 1 | 0.8 |
| A、B 型飞机周期性工作（25 飞行小时） | 8 | 2.5 |
| 注：航空保障装备的其他使用数据与表 6-19 相同。 | | |

3）方案 3（多机种通用化）

在方案 3 中，A、B 两型飞机相同专业系统的航空保障装备通用化（后面统称为多机型通用保障装备），即多机型通用机械保障装备、多机型通用军械保障装备、多机型通用特设保障装备、多机型通用航电保障装备分别负责 A、B 两型飞机机械专业系统、军械专业系统、特设专业系统和航电专业系统的维修保障任务。作战单元内航空保障装备配置情况如表 6-22 所示。

表 6-22 作战单元内航空保障装备配置情况（方案 3）

| 作战单元 | 航空保障装备名称 | 数量 | 保障对象 |
|---------|-------------|----|----------------|
| ××多机种基地 | 多机型通用机械保障装备 | 2 | A、B 两型飞机机械专业系统 |
| | 多机型通用军械保障装备 | 2 | A、B 两型飞机军械专业系统 |
| | 多机型通用特设保障装备 | 2 | A、B 两型飞机特设专业系统 |
| | 多机型通用航电保障装备 | 2 | A、B 两型飞机航电专业系统 |

A、B 两型飞机保障活动占用航空保障装备情况同方案 1。

4）方案 4（多机种多专业通用化）

在方案 4 中，同型飞机机械、特设专业系统航空保障装备通用化，A、B 两型飞机相同专业系统的航空保障装备通用化，即多机型通用机电保障装备、多机型通用军械保障装备、多机型通用航电保障装备分别负责 A、B 两型飞机机械与特设专业系统、军械专业系统、航电专业系统的维修保障任务。作战单元内航空保障装备配置情况如表 6-23 所示。

表 6-23 作战单元内航空保障装备配置情况（方案 4）

| 作战单元 | 航空保障装备名称 | 数量 | 保障对象 |
|---------|-------------|----|-------------------|
| ××多机种基地 | 多机型通用机电保障装备 | 4 | A、B 两型飞机机械、特设专业系统 |
| | 多机型通用军械保障装备 | 2 | A、B 两型飞机军械专业系统 |
| | 多机型通用航电保障装备 | 2 | A、B 两型飞机航电专业系统 |

A、B 两型飞机保障活动占用航空保障装备情况同方案 2。

6.5.4 仿真模型

依据 6.5.3 节给出的基本想定，基于 SIMLOX 平台建立相关仿真模型，受篇幅限制这里仅给出任务模型、功能模型、保障活动模型、保障资源模型中相关表单的关系，以及关键表单的数据定义。

1. 任务模型

在 SIMLOX 模型中定义任务模型的表单主要有 Unit、Operation、Mission Type、Operation Profile 等，各表单之间的关系如图 6-11 所示。

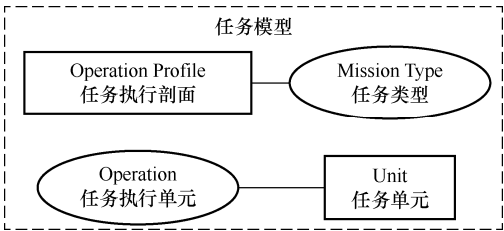


图 6-11 任务模型中各表单之间的关系

其中，案例中 Mission Type 基本任务数据、Operation Profile 任务执行剖面数据的定义如图 6-12 和图 6-13 所示。

| MTID | DESCR | NOS | MNOS | MNOSA | DURN | DURND |
|-------------------------|-------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------------|-----------------------------|-------------------------------|
| Mission type identifier | Description | Nominal number of systems | Minimum number of systems | Minimum number of systems abort | Mission duration [Hours] | Mission duration distribution |
| M1 | | 1 | 1 | | 1.5 | |
| M2 | | 2 | 2 | | 1.5 | |
| M3 | | 4 | 3 | | 1.5 | |
| M4 | | 6 | 5 | | 1.5 | |

图 6-12 Mission Type 基本任务数据定义表图

| | PRID | SPRID | STIM | ITYPE | IQTY | IQTYD | IPER | IDISP |
|----|--------------------|-----------------------|-----------------------|--------------------------------|----------------------------|---------------------------|---------------------------------------|---|
| | Profile identifier | Subprofile identifier | Start time [Hours] | Initiation type <SCHEDULED> | Initiation quantity <1> | Initiation quantity distr | Initiation period [Hours] <0.0> | Initiation distribution pattern <EQUIDIST> |
| 1 | DM1 | M1 | 6.0 | | 8 | | 24.0 | |
| 2 | DM1 | M2 | 8.0 | | 5 | | 24.0 | |
| 3 | | | | | | | | |
| 4 | | | | | | | | |
| 5 | DM2 | M3 | 8.0 | | 5 | | 24.0 | |
| 6 | | | | | | | | |
| 7 | DM3 | M4 | 8.0 | | 3 | | 24.0 | |
| 8 | | | | | | | | |
| 9 | DM_WEEK | DM1 | 0.0 | | 3 | | 72.0 | |
| 10 | DM_WEEK | DM2 | 72.0 | | 1 | | 24.0 | |
| 11 | DM_WEEK | DM3 | 96.0 | | 1 | | 24.0 | |
| 12 | | | | | | | | |
| 13 | DM_YEAR | DM_WEEK | 0.0 | | 50 | | 8400.0 | |
| 14 | | | | | | | | |
| 15 | DM_3YEAR | DM_YEAR | 0.0 | | 3 | | 26280.0 | |
| 16 | | | | | | | | |

图 6-13 Operation Profile 任务执行剖面数据定义表图

2. 功能模型

在 SIMLOX 模型中定义功能模型的表单主要有 System Deployment、System、Item Structure、Item 等，各表单之间的关系如图 6-14 所示。

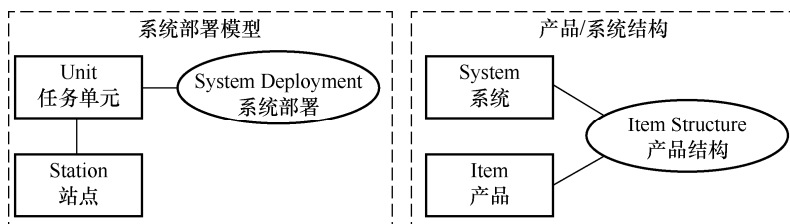


图 6-14 功能模型中各表单之间的关系

其中，案例中 Item Structure 产品结构视图、Item 产品数据定义如图 6-15、图 6-16 所示。

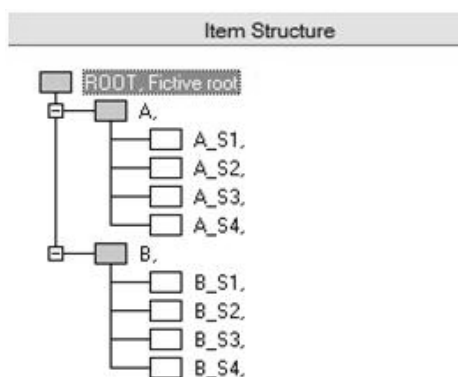


图 6-15 Item Structure 产品结构视图

| IID | DESCR | FRT | OPID | TYPE | GIID | AFFRT | NSIMI | SGID | CRIT |
|-----------------|-------------|----------------------------|---|------|----------------|-------------------------------|-----------------------|------------------|----------------------|
| Item identifier | Description | Failure rate [1/MOPIDs] | Operation parameter identifier <OPHOURS> | Type | Group of items | Application factor <1.000> | Number similar <1> | Similarity group | Criticality <1.0> |
| A_S1 | | 50000.00 | | | GAS1 | | | | 0.25 |
| A_S2 | | 12500.00 | | | GAS2 | | | | 0.25 |
| A_S3 | | 37500.00 | | | GAS3 | | | | 0.25 |
| A_S4 | | 50000.00 | | | GAS4 | | | | 0.25 |
| B_S1 | | 50000.00 | | | GBS1 | | | | 0.25 |
| B_S2 | | 12500.00 | | | GBS2 | | | | 0.25 |
| B_S3 | | 37500.00 | | | GBS3 | | | | 0.25 |
| B_S4 | | 50000.00 | | | GBS4 | | | | 0.25 |

图 6-16 Item 产品数据定义表图

3. 保障活动模型

1) 修复性维修活动模型

在 SIMLOX 模型中，定义修复性维修活动模型的表单主要有 Item Replacement、Item

Repair 等，各表单之间的关系如图 6-17 所示。

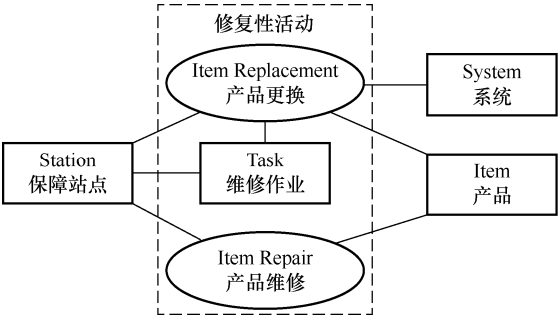


图 6-17 修复性维修活动模型中各表单之间的关系

其中，案例中 Item Replacement 产品更换数据定义如图 6-18 所示。

| | MID | IID | STID | SURPT | SURPF | SURPTID |
|---|---------------------------------------|-----------------------|-----------------------|---------------------------------------|--|--------------------------------|
| | Motheritem or system identifier | Subitem identifier | Station identifier | Subitem replacem TAT [Hours] | Subitem replacem fraction <1.000> | Subitem replacem task id |
| 1 | A | A_S1 | D | 3.0 | | TR_A_S1 |
| 2 | A | A_S2 | D | 3.0 | | TR_A_S2 |
| 3 | A | A_S3 | D | 3.0 | | TR_A_S3 |
| 4 | A | A_S4 | D | 3.0 | | TR_A_S4 |
| 5 | | | | | | |
| 6 | B | B_S1 | D | 3.0 | | TR_B_S1 |
| 7 | B | B_S2 | D | 3.0 | | TR_B_S2 |
| 8 | B | B_S3 | D | 3.0 | | TR_B_S3 |
| 9 | B | B_S4 | D | 3.0 | | TR_B_S4 |

图 6-18 Item Replacement 产品更换数据定义表图

2) 预防性维修活动模型

在 SIMLOX 模型中，定义预防性维修活动模型的表单主要有 Mission Preparation、PM Location、Materiel PM 等，各表单之间的关系如图 6-19 所示。

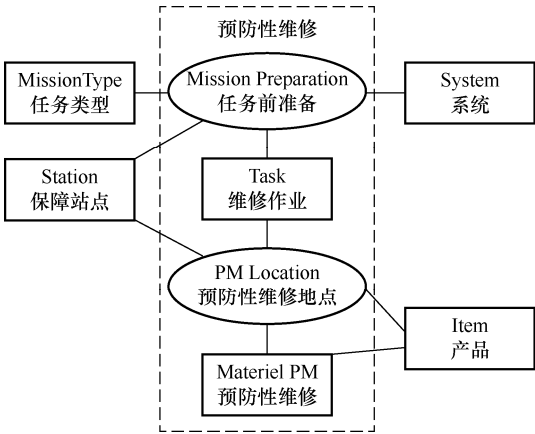


图 6-19 预防性维修活动模型中各表单之间的关系

其中，案例中 PM Location 预防性维修地点、Materiel PM 预防性维修数据定义分别如图 6-20、图 6-21 所示。

| | PMID | ID | STID | PMT | TID |
|---|----------------------------|---------------------------|--------------------|------------------------|-----------------|
| | Prev maint task identifier | System or item identifier | Station identifier | Prev maint TAT [Hours] | Task Identifier |
| 1 | PM_A_1 | A | D | 1.0 | T_PM_A_1 |
| 2 | PM_A_2 | A | D | 8.0 | T_PM_A_2 |
| 3 | PM_A_3 | A | D | 168.0 | |
| 4 | | | | | |
| 5 | PM_B_1 | B | D | 1.0 | T_PM_B_1 |
| 6 | PM_B_2 | B | D | 8.0 | T_PM_B_2 |
| 7 | PM_B_3 | B | D | 168.0 | |

图 6-20 PM Location 预防性维修地点数据

| PMID | DESCR | MID | PMINT | OPID |
|----------------------------|-------------|---------------------|-------------|--------------------------------|
| Prev maint task identifier | Description | Materiel identifier | PM interval | Operation parameter identifier |
| | | | | <OPHOURS> |
| PM_A_1 | | A | 1.000 | MISSIONS |
| PM_A_2 | | A | 25.000 | |
| PM_A_3 | | A | 300.000 | |
| PM_B_1 | | B | 1.000 | MISSIONS |
| PM_B_2 | | B | 25.000 | |
| PM_B_3 | | B | 300.000 | |

图 6-21 Materiel PM 预防性维修数据

4. 保障资源模型

在 SIMLOX 模型中，定义保障资源模型的表单主要有 Task Resource、Resource、Resource Allocation、Resource Station Data 等，各表单之间的关系如图 6-22 所示。

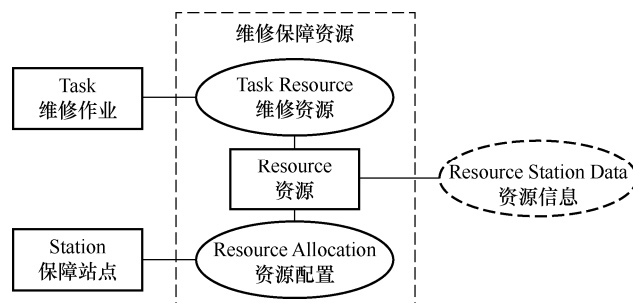


图 6-22 保障资源模型中各表单之间的关系

其中，案例中定义航空保障装备可靠性信息的为 Resource Station Data 表单，其定义如图 6-23 所示。

| | RID | STID | MUTILF | RMTBF | RFTT | RMDT |
|---|---------------------|--------------------|----------------------------|--------------------------------------|--|---------------------------|
| | Resource identifier | Station identifier | Maximum utilization factor | Mean time between failure [Hours] | Resource Failure Time Type <CALENDAR> | Mean down time [Hours] |
| 1 | A_S1_E | D | | 30.0 | OPERATION | 3.0 |
| 2 | A_S2_E | D | | 30.0 | OPERATION | 3.0 |
| 3 | A_S3_E | D | | 30.0 | OPERATION | 3.0 |
| 4 | A_S4_E | D | | 30.0 | OPERATION | 3.0 |
| 5 | | | | | | |
| 6 | B_S1_E | D | | 30.0 | OPERATION | 3.0 |
| 7 | B_S2_E | D | | 30.0 | OPERATION | 3.0 |
| 8 | B_S3_E | D | | 30.0 | OPERATION | 3.0 |
| 9 | B_S4_E | D | | 30.0 | OPERATION | 3.0 |

图 6-23 Resource Station Data 资源数据

6.5.5 仿真数据分析

通过运行 SIMLOX 平台，对 4 种不同航空保障装备方案的效能进行对比分析。其中，总任务强度为：7050 次任务、10575 任务小时、13800 飞行架次、20700 飞行小时；航空保障设备装备可靠性设定为：MTBF 为 30 使用小时、MTTR 为 3 小时。

1. 任务完成情况

4 种航空保障装备方案的任务完成率、任务完成时间如图 6-24 和图 6-25 所示。图中，从左至右水平类别轴依次代表方案 2（多专业通用化）、方案 3（多机种通用化）、方案 4（多机种多专业通用化）和方案 1（原方案）；图例项深灰色为需要完成而未完成的部分、白色为已经完成的部分。

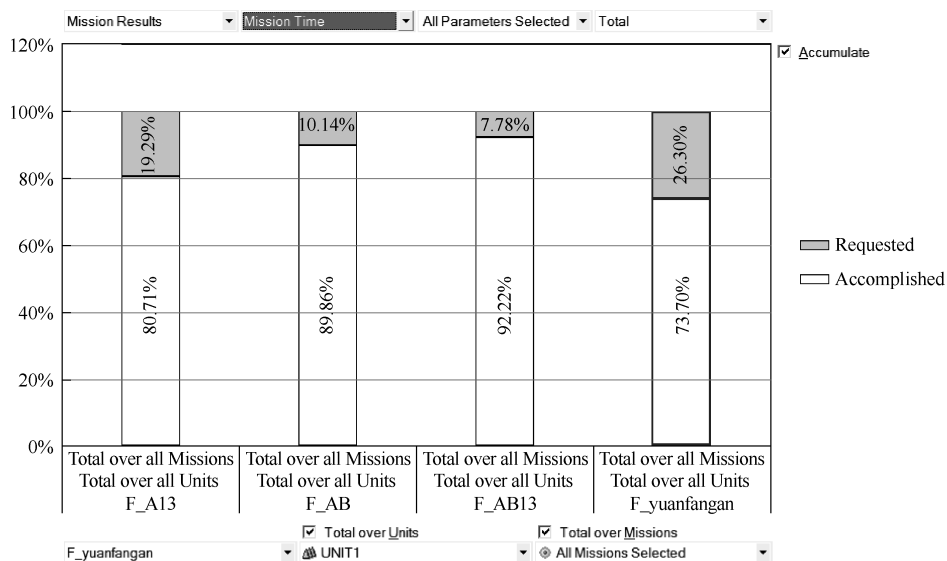


图 6-24 4 种航空保障装备方案的任务完成率

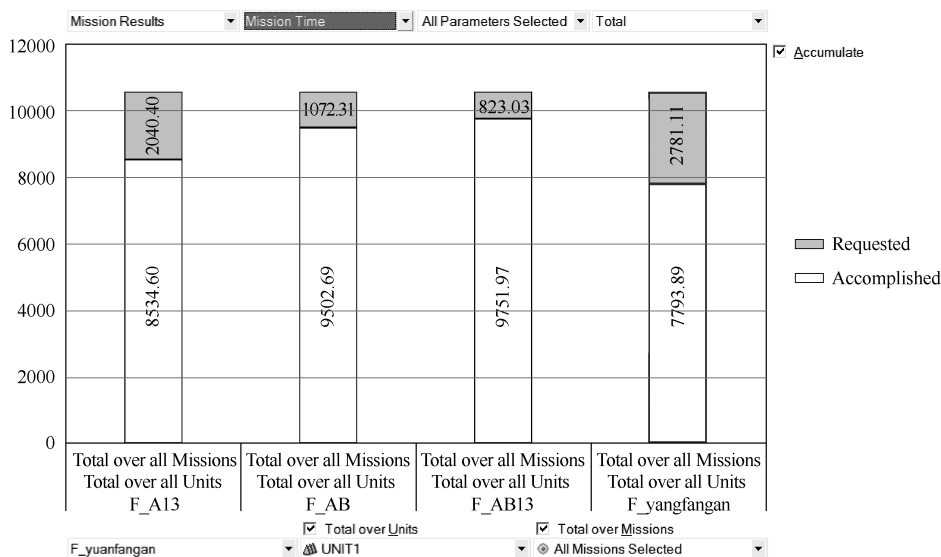


图 6-25 4 种航空保障装备方案的任务完成时间

从图 6-24 和图 6-25 可以看出，在资源数量保持不变的情况下，进行航空保障装备通用化优化后，任务完成效能指标有显著提升，方案 1、方案 2、方案 3、方案 4 的任务效能依次增加。

2. 可用性

4 种航空保障装备方案下的航空装备平均不可用数量如图 6-26 所示。图中，从左至右水平类别轴依次代表方案 2（多专业通用化）、方案 3（多机种通用化）、方案 4（多机种多专业通用化）和方案 1（原方案）；图例项白色为等待维修资源状态、浅灰色为预防性维修状态、深灰色为修复性维修状态。

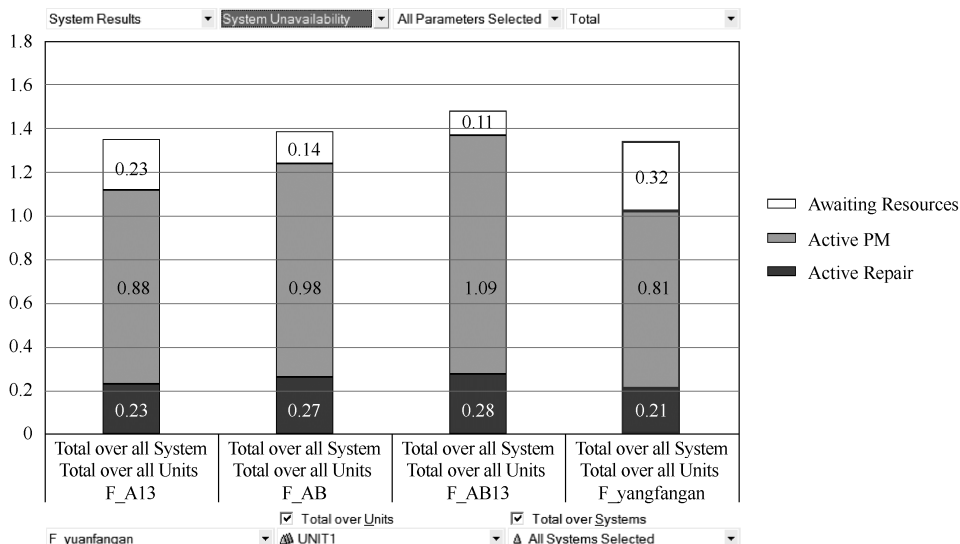


图 6-26 航空装备平均不可用数量

从图 6-26 可以看出，在资源数量保持不变的情况下，进行航空保障装备通用化优化后，可用性效能指标略有降低。其中，方案 1、方案 2、方案 3、方案 4 的任务效能依次降低。指标降低的原因在于：通用化设计后，对应的航空装备使用时间增加（相当于利用率提高），反而导致可用性降低。

3. 资源利用情况

4 种航空保障装备方案下的航空保障装备资源状态如图 6-27 所示。图中，从左至右水平类别轴依次代表方案 2（多专业通用化）、方案 3（多机种通用化）、方案 4（多机种多专业通用化）和方案 1（原方案）；图例项白色为等待状态、灰色为故障状态、麻点为可用状态、深灰色为维修状态。

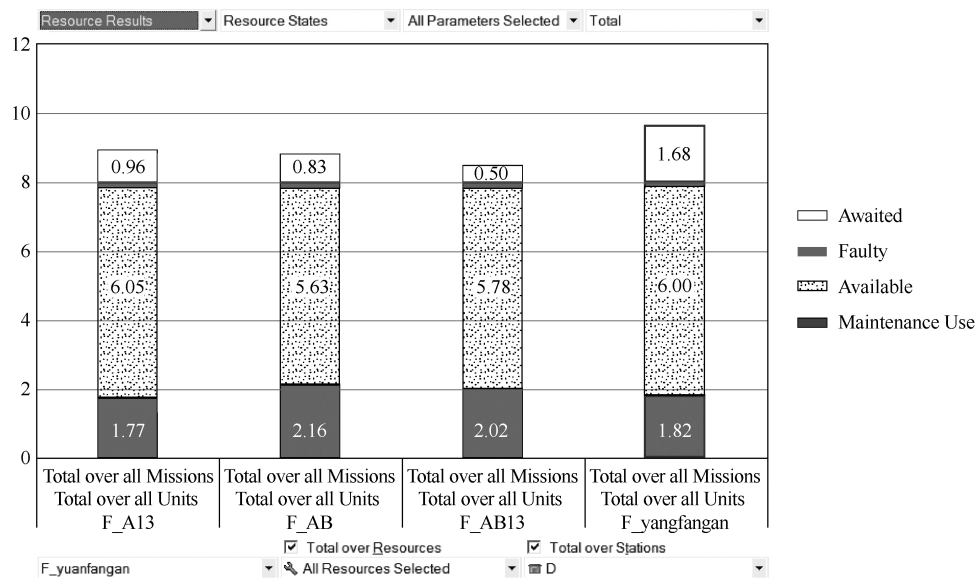


图 6-27 航空保障装备资源状态

从图 6-27 可以看出，在资源数量保持不变的情况下，进行航空保障装备通用化优化后，资源的可用状态效能略有降低且数量都较大，资源等待效能有较大提升。一升一降的原因在于：从整个作战训练周期来看，航空装备处于待命的时间相对较多，航空保障装备的闲置率相对较高，但通用化设计后能明显减少保障装备等待的次数。

4. 相关结论

通过从不同维度对 4 种航空保障装备方案下的效能进行对比分析可以看出，4 种航空保障装备方案的优劣排序为：方案 4（多机种多专业通用化）、方案 3（多机种通用化）、方案 2（多专业通用化）、方案 1（原方案）。考虑多机种多专业通用方案可能给航空保障装备带来设计上的困难，并导致额外的设计、制造费用；而相对而言，多机种通用化方案技术难度可能较低。因此，建议作战单元航空保障装备通用化应先从多机种通用化的路径开始，逐步优化。

使用阶段航空保障装备效能综合评估

使用阶段航空保障装备效能综合评估是航空保障装备管理工作的重要组成部分，对于全面评价航空保障装备的综合保障效益，改进和提升作战单元保障能力具有重要作用。数据包络分析（Data Envelopment Analysis, DEA）作为一种以相对效率概念为基础发展起来的效率评价方法，现已成为管理科学与工程领域中一种重要而有效的分析工具。本章在分析使用阶段航空保障装备效能综合评估特点的基础上，给出使用阶段航空保障装备效能综合评估流程和评估指标体系，并采用 DEA 方法进行综合评估和分析。

7.1 使用阶段航空保障装备效能综合评估概述

7.1.1 使用阶段航空保障装备效能综合评估特点

使用阶段航空保障装备效能综合评估具有以下特点。

1. 评估对象的层次性

由于航空保障装备配属作战单元的层次性，航空保障装备的管理与评估也具有层次性，通常可以区分为基地级、中继级和基层级，或者区分为军种级、战区军种级和部队级。不同保障级别开展航空保障装备效能综合评估的重点有所区别，高保障级别装备管理机关重点在于有效调控航空保障装备配置重点和持续投入方向，做好航空保障装备发展、购置、持续保障的整体规划；低保障级别装备管理机关重点在于分析本单位航空保障装备使用与管理中的薄弱环节，持续改进维修保障质量效益。

2. 评估指标的多样性

在使用阶段航空保障装备效能综合评估过程中，需要考虑的评估指标众多、性质不一。不仅应该包括航空保障装备费用消耗、配套情况等投入性指标，还应包括使用阶段航空保障装备的完好性和利用情况，以及保障规模等效能产出指标。因此，使用阶段航空保障装备效能评估指标具有多样性，需要综合考虑各种投入和产出指标以对其效能进行综合评估。

3. 评估结果的相对性

在使用阶段航空保障装备效能综合评估过程中，重点在于不同评估对象之间的相对比较分析。当评估对象发生变化时，评估结果往往也会发生相应变化。因此，使用阶段航空保障装备效能综合评估结果往往具有相对性。

7.1.2 使用阶段航空保障装备效能综合评估流程

根据使用阶段航空保障装备效能综合评估的基本特点，本章将其抽象为“多输入—多输出”的评估问题，基本评估流程如下。

- (1) 按照科学性、全面性、可获取性、可操作性的原则，以定量指标为主，构建使用阶段航空保障装备效能综合评估指标体系。
- (2) 按单位、机型、价值、功能、来源渠道对航空保障装备进行分类，基于基本作战单元的底层数据，计算不同级别作战单元航空保障装备效能的投入指标和产出指标。
- (3) 利用 DEA 方法对作战单元的航空保障装备效能进行综合评估。
- (4) 通过指标的逐级集成，得到更高级别作战单元的投入指标和产出指标，并利用 DEA 方法对更高级别作战单元的航空保障装备效能进行综合评估。

使用阶段航空保障装备效能综合评估的基本流程如图 7-1 所示。

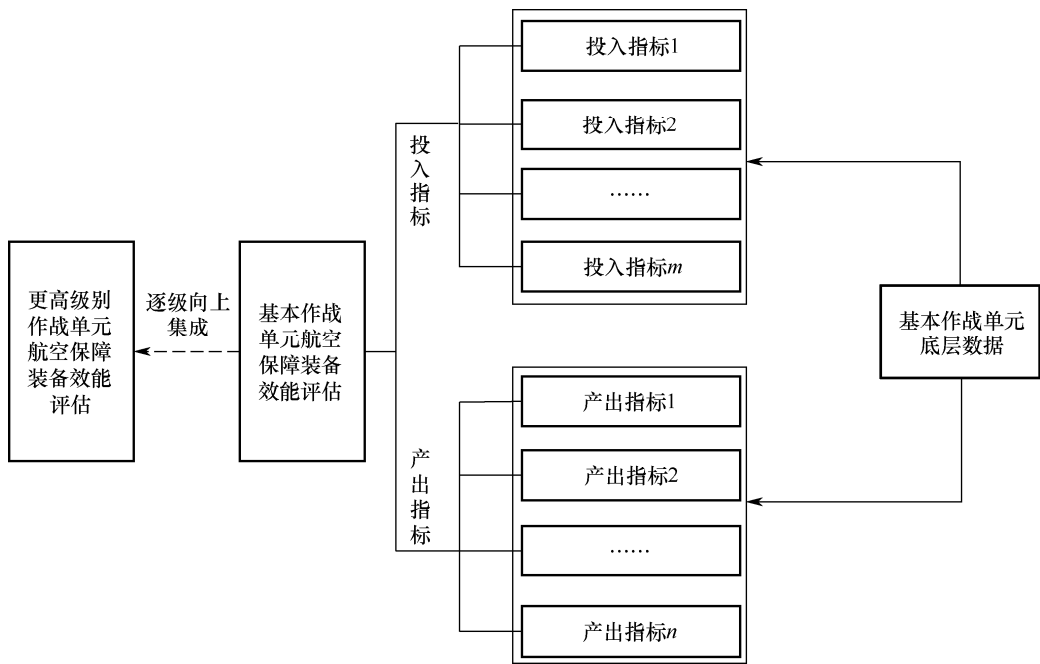


图 7-1 使用阶段航空保障装备效能综合评估的基本流程

7.2 使用阶段航空保障装备效能综合评估指标体系

7.2.1 评估指标体系的构建

使用阶段航空保障装备效能综合评估指标体系的建立应符合以下原则。

1. 科学性原则

运用科学的方法，对使用阶段航空保障装备效能的影响因素和表现形式进行分析，使所设置的评估指标名称及含义、计算途径和方法等均建立在科学分析的基础上。

2. 全面性原则

评价指标的选取应能够全面、系统地反映不同级别作战单元航空保障装备的效能。

3. 可获取性原则

评价指标的选取要考虑可获取性，评估指标的计算应尽可能利用使用维修保障阶段的可用数据。

4. 可操作性原则

评价指标的选取须具备可操作性，以便效能综合评估结束后能为使用阶段航空保障装备效能的改进提供建议和参考。

基于以上原则，本章以定量指标为主，构建了使用阶段航空保障装备效能评估指标体系。其中，投入指标为保障装备购置费用、保障装备平均配套率；产出指标为保障装备平均利用率、保障装备平均完好率、保障装备机动能力指数。

7.2.2 评估指标的计算与集成

1. 投入—产出指标的计算

1) 投入指标的计算

(1) 保障装备购置费用。保障装备购置费用是指购置被评估对象的保障装备所需的费用。考虑不同基本作战单元部署飞机数量不一致，且对保障装备购置费用影响很大，将统一换算为部署 24 架飞机的保障装备所需的购置费用作为投入指标，该指标的计算公式为：

$$C = \frac{24 \sum_{i=1}^n C_i \times s_i}{N_{\text{飞机}}} \quad (7-1)$$

式中， C 为保障装备购置费用； C_i 为第 i 型保障装备的参考单价； s_i 为第 i 型保障装备的现有数量； n 为保障装备种类数量； $N_{\text{飞机}}$ 为评估对象保障的飞机数量。

(2) 保障装备平均配套率。保障装备平均配套率是指被评估对象的保障装备配套率的平均值，该指标的计算公式为：

$$P_l = \frac{\sum_{i=1}^n \min \left\{ \frac{s_i}{y_i}, 1 \right\}}{n} \tag{7-2}$$

式中， P_l 为保障装备平均配套率； s_i 为第 i 型保障装备的现有数量； n 为保障装备种类数量； y_i 为第 i 型保障装备的建议配套数量。

需要说明的是，若第 i 型保障装备的建议配套数量为 0，而现有数量大于 0，则规定 $\frac{s_i}{y_i}$ 按 1 计算。

2) 产出指标的计算

(1) 保障装备平均利用率。保障装备平均利用率是指被评估对象的保障装备利用率的平均值，该指标的计算公式为：

$$P_l = \frac{\sum_{i=1}^n P_{il} \times s_i}{\sum_{i=1}^n s_i} \tag{7-3}$$

式中， P_l 为保障装备平均利用率； s_i 为第 i 型保障装备的现有数量； n 为保障装备种类数量； P_{il} 为第 i 型保障装备的利用率。

在使用维修保障阶段，保障装备的“使用频率”通常采用“经常使用”“不经常使用”“偶尔使用”“从未使用”等定性语言描述。因此，为了将关于保障装备使用频率的定性描述进行量化，设计了保障装备使用频率定性描述的量化表，如表 7-1 所示。根据表 7-1 可以获取第 i 型保障装备的利用率 P_{il} 的量化值。

表 7-1 保障装备使用频率量化表

| | | | |
|------|-------|------|------|
| 经常使用 | 不经常使用 | 偶尔使用 | 从未使用 |
| 1 | 2/3 | 1/3 | 0 |

(2) 保障装备平均完好率。保障装备平均完好率是指被评估对象的保障装备完好率的平均值。在使用维修保障阶段，保障装备的“质量状况”主要采用新品、堪用品、待修品等定性语言描述，保障装备平均完好率的计算公式为：

令

$$X_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{第 } i \text{ 型保障装备的第 } j \text{ 个为新品或堪用品} \\ 0, & \text{第 } i \text{ 型保障装备的第 } j \text{ 个为待修品} \end{cases}$$

则

$$P_w = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{s_i} \frac{X_{ij}}{s_i}}{n} \quad (7-4)$$

式中, P_w 为保障装备平均完好率; s_i 为第 i 型保障装备的现有数量; n 为保障装备种类数量。

(3) 保障装备机动能力指数。由于保障装备的种类数量及每种型号保障装备的数量、体积和重量严重影响保障装备的机动能力, 因此定义保障装备机动能力指数作为保障装备效能的输出指标。该指标借鉴美军保障性定量要求中“部署性”的定义思路, 将部署 24 架飞机的保障装备所需的大型运输机 (如伊尔 76) 的数量的倒数作为保障装备机动能力指数。

该指标的计算方法采用工程估算法, 即根据大型运输机的最大载重和货舱容积、保障装备的种类数量, 以及每种型号保障装备的数量、体积和重量等数据资料, 估算出部署保障装备所需的大型运输机的数量。然后, 按照式 (7-5) 计算保障装备机动能力指数。

$$P_g = \frac{1}{\max \left\{ 24 \sum_{i=1}^n m_i s_i / m N_{\text{飞机}}, 24 \sum_{i=1}^n v_i s_i / v N_{\text{飞机}} \right\}} \quad (7-5)$$

式中, P_g 为保障装备机动能力指数; m_i 为第 i 型保障装备的重量; v_i 为第 i 型保障装备的体积; m 为运输机的最大载重; v 为运输机的货舱容积; s_i 为第 i 型保障装备的现有数量; n 为保障装备种类数量; $N_{\text{飞机}}$ 为评估对象保障的飞机数量。

2. 投入—产出指标的集成

下面以示例的形式详细说明投入—产出指标的集成方法。

假设基本作战单元外场维修专业包括机械、军械、特设、航电 4 个专业, 现已计算出基本作战单元机械、军械、特设、航电 4 个专业的航空保障装备的投入—产出指标, 现要求通过集成计算出基本作战单元外场航空保障装备的投入—产出指标。

1) 投入指标的集成

(1) 保障装备购置费用。基本作战单元航空保障装备购置费用 (换算为 24 架飞机) 由机械、军械、特设、航电 4 个专业航空保障装备的购置费用及飞机数量计算得出, 集成公式为:

$$C = \frac{24 \sum_{i=1}^4 C^i}{N_{\text{飞机}}} \quad (7-6)$$

式中, C 为基本作战单元航空保障装备的购置费用; C^i 为基本作战单元第 i 个专业航空保障装备的购置费用, $i=1、2、3、4$; $N_{\text{飞机}}$ 为评估对象保障的飞机数量。

(2) 保障装备平均配套率。基本作战单元航空保障装备的平均配套率由机械、军械、特设、航电 4 个专业航空保障装备的平均配套率及种类数量计算得出, 集成公式为:

$$P_l = \frac{\sum_{i=1}^4 P_l^i n_i}{\sum_{i=1}^4 n_i} \quad (7-7)$$

式中, P_l 为基本作战单元航空保障装备的平均配套率; P_l^i 为基本作战单元第 i 个专业航空保障装备的平均配套率, $i=1、2、3、4$; n_i 为基本作战单元第 i 个专业航空保障装备的种类数, $i=1、2、3、4$ 。

2) 产出指标的集成

(1) 保障装备平均利用率。基本作战单元航空保障装备的平均利用率由机械、军械、特设、航电 4 个专业航空保障装备的平均利用率、种类数量及每种保障装备的现有数量计算得出, 集成公式为:

$$P_l = \frac{\sum_{j=1}^4 \sum_{i=1}^{n_i} P_l^j s_i^j}{\sum_{j=1}^4 \sum_{i=1}^{n_i} s_i^j} \quad (7-8)$$

式中, P_l 为基本作战单元航空保障装备的平均利用率; P_l^j 为基本作战单元第 j 个专业航空保障装备的平均利用率, $j=1、2、3、4$; n_i 为基本作战单元第 i 个专业航空保障装备的种类数量, $i=1、2、3、4$; s_i^j 为基本作战单元第 j 个专业的第 i 种航空保障装备现有数, $j=1、2、3、4$, $i=1、2、\dots、n_i$ 。

(2) 保障装备平均完好率。基本作战单元航空保障装备平均完好率由机械、军械、特设、航电 4 个专业航空保障装备的平均完好率及种类数量计算得出, 集成公式为:

$$P_w = \frac{\sum_{i=1}^4 P_w^i n_i}{\sum_{i=1}^4 n_i} \quad (7-9)$$

式中, P_w 为基本作战单元航空保障装备的平均完好率; P_w^i 为基本作战单元第 i 个专业航空保障装备的平均完好率, $i=1、2、3、4$; n_i 为基本作战单元第 i 个专业航空保障装备的种类数量, $i=1、2、3、4$ 。

(3) 保障装备机动能力指数。基本作战单元航空保障装备的机动能力指数由机械、军械、特设、航电 4 个专业航空保障装备的机动能力指数直接计算得出, 集成公式为:

$$P_g = \frac{1}{\sum_{j=1}^4 \frac{1}{P_g^j}} \quad (7-10)$$

式中, P_g 为基本作战单元航空保障装备的机动能力指数; P_g^j 为基本作战单元第 j 个专业航空保障装备的机动能力指数, $j=1、2、3、4$ 。

7.2.3 数据需求

为了能够实现上述相关投入和产出指标的计算，需要收集使用阶段航空保障装备的相关费用、配套、使用参数。航空保障装备效能综合评估的底层基本数据需求汇总如表 7-2 所示。

表 7-2 航空保障装备效能综合评估的底层基本数据需求汇总

| 指标 | 投入指标 | | 产出指标 | | |
|------|--|--|--|--|--|
| | 保障装备购置费用 | 保障装备配套率 | 保障装备利用率 | 保障装备完好率 | 保障装备机动能力指数 |
| 数据需求 | <ul style="list-style-type: none"> 规格型号 现有数量 参考单价 | <ul style="list-style-type: none"> 规格型号 现有数量 建议配套数量 | <ul style="list-style-type: none"> 规格型号 现有数量 使用频率 | <ul style="list-style-type: none"> 规格型号 现有数量 质量状况 | <ul style="list-style-type: none"> 规格型号 现有数量 体积 重量 飞机数量 运输机的承载能力 |

为进一步按照单位、机型、内外场、专业、价值、功能、来源渠道等的不同，对航空保障装备效能进行综合评估，需要细化航空保障装备分类数据需求，如表 7-3 所示。

表 7-3 航空保障装备分类数据需求

| 单位机型 | 价值 | 内外场 | 专业 | 功能 | 来源渠道 |
|--|---|--|---|---|--|
| <ul style="list-style-type: none"> 单位 机型 | <ul style="list-style-type: none"> 一般 高价值 | <ul style="list-style-type: none"> 外场 内场 | <ul style="list-style-type: none"> 机械 军械 特设 航电 | <ul style="list-style-type: none"> 通用/专用工具 通用/专用修理工艺设备 通用/专用地面保障设备 通用/专用测试设备 防护装具 信息化保障装备 | <ul style="list-style-type: none"> 随装配套 上级配发 自购 自制 |

7.3 基于 DEA 的使用阶段航空保障装备效能综合评估

7.3.1 使用阶段航空保障装备有效性分析

以使用阶段基本作战单元的航空保障装备有效性分析为例，设有 $n+1$ 个被评价的基本作战单元，称为决策单元 DMU。每个决策单元有 m 种输入和 s 种输出，如表 7-4 所示。其中， x_{ij} 为第 j 个 DMU 对第 i 种输入的投入量， $x_{ij} > 0$ ， $i=1、2、\cdots、m$ ， $j=0、1、2、\cdots、n$ ； y_{rj} 表示第 j 个决策单元对第 r 种输出的产出量， $y_{rj} > 0$ ， $r=1、2、\cdots、s$ 。决策单元的输入与输出都是已知数据，可以根据历史数据得到。 v_i 表示第 i 种输入的重要性或权； u_r 表示第 r 种输出的重要性或权，它们在模型中是变量。

表 7-4 决策单元的输入和输出

| | 0 | 1 | ... | j | ... | n | |
|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|--|
| v_1 | x_{10} | x_{11} | ... | x_{1j} | ... | x_{1n} | |
| \vdots | \vdots | \vdots | \vdots | \vdots | \vdots | \vdots | |
| v_m | x_{m0} | x_{m1} | ... | x_{mj} | ... | x_{mn} | |

| | | | | | | | |
|--|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | y_{10} | y_{11} | ... | y_{1j} | ... | y_{1n} | u_1 |
| | \vdots | \vdots | \vdots | \vdots | \vdots | \vdots | \vdots |
| | y_{s0} | y_{s1} | ... | y_{sj} | ... | y_{sn} | u_s |

对应于一组权系数 $V = (v_1, v_2, \dots, v_m)^T$ 和 $U = (u_1, u_2, \dots, u_s)^T$, 每个决策单元都有相应的效率评价指数

$$h_j = \frac{U^T Y_j}{V^T X_j} = \frac{\sum_{r=1}^s u_r y_{rj}}{\sum_{i=1}^m v_i x_{ij}}, \quad j=0, 1, \dots, n \quad (7-11)$$

式中, $X_j = (x_{1j}, x_{2j}, \dots, x_{mj})^T$ 和 $Y_j = (y_{1j}, y_{2j}, \dots, y_{sj})^T$ 。由于效率指数是一个相对数, 所以总可以选择权系数, 使其满足 $h_j \leq 1, j=0, 1, 2, \dots, n$ 。

现在要对第 0 个决策单元进行效率评价, 以权系数 U, V 为变量, 以第 0 个决策单元的效率指数为目标函数, 以所有决策单元 (包括决策单元 0) 的效率指数为约束, 即 $h_j \leq 1, j=0, 1, 2, \dots, n$, 构造如下最优化模型 (为便于叙述, 将决策单元 j 记作 j -DMU):

$$\begin{aligned} \max h_0 &= \frac{\sum_{r=1}^s u_r y_{r0}}{\sum_{i=1}^m v_i x_{i0}} \\ \text{s.t.} \quad &\begin{cases} h_j = \frac{\sum_{r=1}^s u_r y_{rj}}{\sum_{i=1}^m v_i x_{ij}} \leq 1, & j=0, 1, 2, \dots, n \\ V = (v_1, v_2, \dots, v_m)^T \geq 0 \\ U = (u_1, u_2, \dots, u_s)^T \geq 0 \end{cases} \end{aligned} \quad (7-12)$$

式中, 向量 $V \geq 0$ 表示它的所有分量都大于或等于零, 且至少存在一个分量大于零。上面规划的向量形式为:

$$\begin{aligned} \max & \frac{U^T Y_0}{V^T X_0} \\ \text{s.t.} \quad &\begin{cases} \frac{U^T Y_j}{V^T X_j} \leq 1, & j=0, \dots, n \\ U \geq 0, & V \geq 0 \end{cases} \end{aligned} \quad (7-13)$$

式中, $j = \overline{0, n}$ 表示 $j=0, 1, 2, \dots, n$ 。

这是一个分式规划问题, 利用 Charnes-Cooper 变换, 可以将其转化为一个等价的线性规划问题。

令

$$t = \frac{1}{V^T X_0} \quad \omega = t \times V \quad \mu = t \times U$$

则有

$$\mu^T Y_0 = \frac{U^T Y_0}{V^T X_0} \quad \frac{\mu^T Y_j}{\omega^T X_j} = \frac{U^T Y_j}{V^T X_j} \leq 1 \quad \omega^T X_0 = 1 \quad \omega \geq 0, \quad \mu \geq 0$$

于是, 上面的规划就转化成一个等价的线性规划, 即

$$(P_{C^2R}) \quad \begin{aligned} & \max \mu^T Y_0 \\ & \text{s.t.} \begin{cases} \omega^T X_j - \mu^T Y_j \geq 0, \quad j = \overline{0, n} \\ \omega^T X_0 = 1 \\ \omega \geq 0, \quad \mu \geq 0 \end{cases} \end{aligned} \quad (7-14)$$

其对偶规划为:

$$(D_{C^2R}) \quad \begin{aligned} & \min \theta \\ & \text{s.t.} \begin{cases} \sum_{j=0}^n X_j \lambda_j \leq \theta X_0 \\ \sum_{j=0}^n Y_j \lambda_j \geq Y_0 \\ \lambda_j \geq 0, \quad j = \overline{0, n} \end{cases} \end{aligned} \quad (D_{C^2R}^1) \quad \begin{aligned} & \min \theta \\ & \text{s.t.} \begin{cases} \sum_{j=0}^n X_j \lambda_j + S^- = \theta X_0 \\ \sum_{j=0}^n Y_j \lambda_j - S^+ = Y_0 \\ S^-, S^+, \lambda_j \geq 0, \quad j = \overline{0, n} \end{cases} \end{aligned} \quad (7-15)$$

定理 7-1 规划 P_{C^2R} 与其对偶规划 D_{C^2R} 都存在可行解, 因而都有最优解, 设它们的最优值分别是 $h_0^* = \theta^* \leq 1$ 。(证明略)

为了应用模型对使用阶段航空保障装备的有效性进行分析, 下面给出决策单元有效和弱有效的定义。

定义 7-1 若 0-DMU 的 P_{C^2R} 模型最优值等于 1, 即 $h_0^* = 1$, 则称 0-DMU 为弱 DEA 有效 (C^2R)。

定义 7-2 若 0-DMU 的 P_{C^2R} 模型最优值等于 1, 且存在最优解 ω^*, μ^* , 满足 $\omega^* > 0, \mu^* > 0$, 则称 0-DMU 为 DEA 有效 (C^2R)。

借助对偶规划来判断决策单元的有效性, 有定理 7-2。

定理 7-2 (1) 0-DMU 为 DEA 有效的充分必要条件是规划 (D_{C^2R}) 的最优值 $\theta^* = 1$ 。

(2) 0-DMU 为 DEA 有效的充分必要条件是规划 $D_{C^2R}^1$ 的最优值 $\theta^* = 1$, 并且对每个最优解 $\lambda^*, S^{*-}, S^{*+}$ 都有 $S^{*-} = 0, S^{*+} = 0$ 。

根据 DEA 有效性的定义, 判定决策单元的 DEA 有效性除需要求出模型的最优值外, 还要确定模型最优解的符号。鉴于线性规划会有多重最优解的可能性, 一般采用带有非阿

基米德无穷小的 DEA 模型判定决策单元的有效性。

在实数中,认为非阿基米德无穷小是一个比任何正数小且大于 0 的数。在实际应用中,常用 ε 表示这个足够小的数,如 $\varepsilon=10^{-6}$,这个数是一个相对数,应根据实际问题选择。考虑带有非阿基米德无穷小量 ε 的 C^2R 模型 P_ε 为:

$$(P_\varepsilon) \begin{cases} \max \mu^T Y_0 \\ \omega^T X_j - \mu^T Y_j \geq 0, j = \overline{0, n} \\ \omega^T X_0 = 1 \\ \mu \geq \varepsilon \hat{e}, \omega \geq \varepsilon e \end{cases} \quad (7-16)$$

式中, $\hat{e} = (1, 1, \dots, 1)^T \in R^m$ (表示它有 m 个分量), $e = (1, 1, \dots, 1)^T \in R^s$ 。其对偶规划为:

$$(D_\varepsilon) \begin{cases} \min \theta - \varepsilon(\hat{e}^T S^- + e^T S^+) \\ \sum_{j=0}^n X_j \lambda_j + S^- = \theta X_0 \\ \sum_{j=0}^n Y_j \lambda_j - S^+ = Y_0 \\ S^-, S^+, \lambda_j \geq 0, j = \overline{0, n} \end{cases} \quad (7-17)$$

利用此模型,可以对使用阶段航空保障装备的有效性进行分析。对此,有定理 7-3。

定理 7-3 设 ε 为非阿基米德无穷小量,规划问题 (D_ε) 的最优解为 λ^* 、 S^{*-} 、 S^{*+} 、 θ^* ,则

- (1) 若 $\theta^*=1$, 则 0-DMU 为弱 DEA 有效。
- (2) 若 $\theta^*=1$, 且 $S^{*-}=0$ 、 $S^{*+}=0$, 则 0-DMU 为 DEA 有效。
- (3) 若 $\theta^*<1$, 则 0-DMU 为非 DEA 有效。

7.3.2 使用阶段航空保障装备效能的投影改进分析

当 (X_0, Y_0) 为第 0 个决策单元的生产活动时, C^2R 模型 DEA 有效性的实质就是:在现有的生产状态下,若第 0 个决策单元的最小输出为 Y_0 ,到底需要多少 X_0 ,效率指数 θ 越大,说明第 0 个决策单元的输入越少,也就是说它的效率最高。同样效率指数 θ 越小,说明 0-DMU 的输入越多,也就是说它的效率最差。

设 ε 为非阿基米德无穷小量,规划问题 (D_ε) 的最优解为 λ^* 、 S^{*-} 、 S^{*+} 、 θ^* ,令

$$\hat{X}_0 = \theta^* X_0 - S^{*-}, \quad \hat{Y}_0 = Y_0 + S^{*+} \quad (7-18)$$

式中, (\hat{X}_0, \hat{Y}_0) 为 0-DMU 对应的 (X_0, Y_0) 在 DEA 的相对有效面上的投影。

0-DMU 对应的 (X_0, Y_0) 的投影 (\hat{X}_0, \hat{Y}_0) 构成了一个新的评价单元。有定理证明新评价单元 (\hat{X}_0, \hat{Y}_0) 相对于原来的 $n+1$ 个评价单元来说,是 DEA 有效的。由此可见,对非 DEA 有效的评价单元 (\hat{X}_0, \hat{Y}_0) ,通过其在 DEA 相对有效面上的投影可以构建一个对应的 DEA 相对有效评价单元,给如何改造非 DEA 有效的航空保障装备效能综合评价单元指出了可行方向。

7.3.3 使用阶段航空保障装备效能排序

带有非阿基米德无穷小量 ε 的 C^2R 模型虽然可以对使用阶段航空保障装备进行有效性分析,但是在存在多个有效 DMU 的情况下,无法对这些有效的 DMU 进行效率比较,为此给出扩展 DEA 模型—— EC^2R 模型。

EC^2R 模型与 C^2R 模型有本质的区别,弱化了 C^2R 模型的约束条件,在对 0-DMU 进行效率评价时,将约束条件 $\frac{U^T Y_0}{V^T X_0} \leq 1$ 去掉,得到 EC^2R 模型为:

$$\begin{aligned} & \max \frac{U^T Y_0}{V^T X_0} \\ & \text{s.t.} \begin{cases} \frac{U^T Y_j}{V^T X_j} \leq 1, & j = \overline{1, n} \\ U \geq 0, & V \geq 0 \end{cases} \end{aligned} \quad (7-19)$$

利用 Charnes-Cooper 变换可将上述分式规化转化为等价的线性规划

$$\begin{aligned} & \max \mu^T Y_0 \\ & (P_{EC^2R}) \text{ s.t.} \begin{cases} \omega^T X_j - \mu^T Y_j \geq 0, & j = \overline{1, n} \\ \omega^T X_0 = 1 \\ \omega \geq 0, & \mu \geq 0 \end{cases} \end{aligned} \quad (7-20)$$

其对偶规划为:

$$\begin{aligned} & \min \theta \\ & (D_{EC^2R}) \text{ s.t.} \begin{cases} \sum_{j=0}^n X_j \lambda_j \leq \theta X_0 \\ \sum_{j=0}^n Y_j \lambda_j \geq Y_0 \\ \lambda_j \geq 0, & j = \overline{1, n} \end{cases} \end{aligned} \quad \begin{aligned} & \min \theta \\ & \text{s.t.} \begin{cases} \sum_{j=0}^n X_j \lambda_j + S^- = \theta X_0 \\ \sum_{j=0}^n Y_j \lambda_j - S^+ = Y_0 \\ S^-, S^+, \lambda_j \geq 0, & j = \overline{1, n} \end{cases} \end{aligned} \quad (7-21)$$

利用 EC^2R 模型即可对使用阶段航空保障装备效能的大小进行比较排序。

7.4 使用阶段航空保障装备效能综合评估案例

7.4.1 案例概述

本案例主要以基本作战单元为例,说明使用阶段航空保障装备效能综合评估方法和过程。假设基本作战单元 A、B、C、D 各装备有 28 架、29 架、26 架、24 架某型飞机,4 个

基本作战单元航空保障装备清单如表 7-5～表 7-8 所示。现拟用 DEA 方法对 4 个基本作战单元航空保障装备效能进行综合评估。

表 7-5 基本作战单元 A 航空保障装备清单

| 序号 | 设备名称 | 实有数量 | 应配数量 | 单价（万元） | 堪用数量 | 待修数量 | 使用频率 |
|----|----------------|------|------|---------|------|------|-------|
| 1 | A-Equipment_1 | 3 | 3 | 65 | 2 | 1 | 不经常使用 |
| 2 | A-Equipment_2 | 1 | 1 | 52.9821 | 1 | 0 | 不经常使用 |
| 3 | A-Equipment_3 | 4 | 4 | 50 | 2 | 2 | 不经常使用 |
| 4 | A-Equipment_4 | 4 | 6 | 12 | 1 | 3 | 经常使用 |
| 5 | A-Equipment_5 | 2 | 4 | 18 | 1 | 0 | 经常使用 |
| 6 | A-Equipment_6 | 5 | 5 | 11 | 5 | 0 | 不经常使用 |
| 7 | A-Equipment_7 | 2 | 2 | 15 | 2 | 0 | 不经常使用 |
| 8 | A-Equipment_8 | 3 | 4 | 10.7643 | 3 | 0 | 经常使用 |
| 9 | A-Equipment_9 | 3 | 3 | 30 | 3 | 0 | 偶尔使用 |
| 10 | A-Equipment_10 | 1 | 1 | 14.5 | 1 | 0 | 偶尔使用 |
| 11 | A-Equipment_11 | 1 | 1 | 65 | 1 | 0 | 经常使用 |
| 12 | A-Equipment_12 | 1 | 2 | 50 | 1 | 0 | 经常使用 |
| 13 | A-Equipment_13 | 1 | 1 | 15 | 1 | 0 | 经常使用 |

表 7-6 基本作战单元 B 航空保障装备清单

| 序号 | 设备名称 | 实有数量 | 应配数量 | 单价（万元） | 堪用数量 | 待修数量 | 使用频率 |
|----|---------------|------|------|--------|------|------|-------|
| 1 | B-Equipment_1 | 5 | 5 | 14.14 | 3 | 2 | 经常使用 |
| 2 | B-Equipment_2 | 3 | 3 | 51.79 | 2 | 1 | 经常使用 |
| 3 | B-Equipment_3 | 3 | 3 | 12 | 3 | 0 | 经常使用 |
| 4 | B-Equipment_4 | 2 | 2 | 75 | 2 | 0 | 经常使用 |
| 5 | B-Equipment_5 | 2 | 0 | 75 | 2 | 0 | 偶尔使用 |
| 6 | B-Equipment_6 | 1 | 1 | 12 | 1 | 0 | 不经常使用 |

表 7-7 基本作战单元 C 航空保障装备清单

| 序号 | 设备名称 | 实有数量 | 应配数量 | 单价（万元） | 堪用数量 | 待修数量 | 使用频率 |
|----|----------------|------|------|---------|------|------|------|
| 1 | C-Equipment_1 | 2 | 3 | 10.7643 | 2 | 0 | 经常使用 |
| 2 | C-Equipment_2 | 2 | 3 | 50 | 2 | 0 | 经常使用 |
| 3 | C-Equipment_3 | 2 | 3 | 30 | 2 | 0 | 经常使用 |
| 4 | C-Equipment_4 | 2 | 3 | 5 | 2 | 0 | 经常使用 |
| 5 | C-Equipment_5 | 2 | 3 | 65 | 2 | 0 | 经常使用 |
| 6 | C-Equipment_6 | 4 | 6 | 0.88 | 4 | 0 | 经常使用 |
| 7 | C-Equipment_7 | 1 | 2 | 50 | 1 | 0 | 经常使用 |
| 8 | C-Equipment_8 | 2 | 2 | 65 | 2 | 0 | 经常使用 |
| 9 | C-Equipment_9 | 2 | 3 | 12 | 2 | 0 | 经常使用 |
| 10 | C-Equipment_10 | 2 | 3 | 5.4 | 2 | 0 | 经常使用 |
| 11 | C-Equipment_11 | 2 | 3 | 11 | 2 | 0 | 经常使用 |
| 12 | C-Equipment_12 | 2 | 3 | 5.8 | 2 | 0 | 经常使用 |

(续表)

| 序号 | 设备名称 | 实有数量 | 应配数量 | 单价(万元) | 堪用数量 | 待修数量 | 使用频率 |
|----|----------------|------|------|--------|------|------|------|
| 13 | C-Equipment_13 | 2 | 3 | 8 | 2 | 0 | 经常使用 |
| 14 | C-Equipment_14 | 1 | 1 | 4.5 | 1 | 0 | 经常使用 |

表 7-8 基本作战单元 D 航空保障装备清单

| 序号 | 设备名称 | 实有数量 | 应配数量 | 单价(万元) | 堪用数量 | 待修数量 | 使用频率 |
|----|---------------|------|------|---------|------|------|-------|
| 1 | D-Equipment_1 | 2 | 6 | 12 | 0 | 2 | 经常使用 |
| 2 | D-Equipment_2 | 2 | 2 | 65 | 1 | 1 | 不经常使用 |
| 3 | D-Equipment_3 | 2 | 2 | 65 | 2 | 0 | 不经常使用 |
| 4 | D-Equipment_4 | 2 | 2 | 50 | 2 | 0 | 经常使用 |
| 5 | D-Equipment_5 | 1 | 2 | 50 | 1 | 0 | 经常使用 |
| 6 | D-Equipment_6 | 2 | 1 | 30 | 2 | 0 | 从未使用 |
| 7 | D-Equipment_7 | 2 | 3 | 11 | 2 | 0 | 经常使用 |
| 8 | D-Equipment_8 | 2 | 2 | 10.7643 | 2 | 0 | 不经常使用 |
| 9 | D-Equipment_9 | 2 | 2 | 18 | 2 | 0 | 经常使用 |

7.4.2 评估指标的计算

下面以基本作战单元 A 为例, 说明投入和产出指标的计算方法。

1. 投入指标的计算

1) 保障装备购置费用

由式 (7-1), 得

$$C = \frac{24 \sum_{i=1}^n C_i \times s_i}{28} = \frac{24 \times (3 \times 65 + \dots + 1 \times 15)}{28} = 757.5214$$

2) 保障装备平均配套率

由式 (7-2), 得

$$P_i = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{s_i}{y_i}}{n} = \frac{\frac{3}{3} + \frac{1}{1} + \dots + \frac{1}{1}}{13} = 0.8782$$

2. 产出指标的计算

1) 保障装备平均利用率

由式 (7-3), 得

$$P_l = \frac{\sum_{i=1}^n P_{il} \times s_i}{\sum_{i=1}^n s_i} = \frac{3 \times \frac{2}{3} + 1 \times \frac{2}{3} + \dots + 1 \times 1}{3 + 1 + \dots + 1} = 0.75$$

2) 保障装备平均完好率

由式 (7-4)，得

$$P_w = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{s_i} \frac{X_{ij}}{s_i}}{n} = \frac{\frac{2}{3} + \frac{1}{1} + \cdots + \frac{1}{1}}{13} = 0.8782$$

3) 保障装备机动能力指数

根据伊尔 76 运输机的技术数据，其最大载重为 50t、货舱容积为 321m³。基本作战单元 A 航空保障装备的总重量为 30t、总容积为 150m³。由式 (7-5)，得

$$P_g = \frac{1}{\max \left\{ 24 \sum_{i=1}^n m_i s_i / m N_{\text{飞机}}, 24 \sum_{i=1}^n v_i s_i / v N_{\text{飞机}} \right\}} = \frac{1}{\max \left\{ \frac{24 \times 30}{28 \times 50}, \frac{24 \times 150}{28 \times 321} \right\}} = 1.9455$$

同理，可以计算出基本作战单元 B、C、D 航空保障装备效能综合评估的输入—输出指标数据如表 7-9 所示。

表 7-9 4 个基本作战单元航空保障装备效能综合评估的输入—输出指标

| 投入和产出指标 | 基本作战单元 | | | |
|-------------------|----------|----------|----------|----------|
| | A | B | C | D |
| 投入指标 1：保障装备购置费用 | 757.5214 | 475.0924 | 548.2602 | 573.5286 |
| 投入指标 2：保障装备平均配套率 | 0.8782 | 1 | 0.702381 | 0.833333 |
| 产出指标 1：保障装备平均利用率 | 0.75 | 0.895833 | 1 | 0.764706 |
| 产出指标 2：保障装备平均完好率 | 0.8782 | 0.877778 | 1 | 0.833333 |
| 产出指标 3：保障装备机动能力指数 | 1.9455 | 3.5587 | 1.9920 | 3.1153 |

7.4.3 航空保障装备有效性分析

由于通过产出指标3（保障装备机动能力指数）的计算直接获得实际数据较难，因此需要采用工程估算法，但计算结果可能存在较大误差。为说明问题，下面分别对“2 个投入指标和 3 个产出指标”和“2 个投入指标和 2 个产出指标”两种情况进行 4 个基本作战单元航空保障装备的有效性分析。

1. 选择“2 个投入指标和 3 个产出指标”的情况

选择“2 个投入指标和 3 个产出指标”，将表 7-9 中 4 个基本作战单元航空保障装备效能综合评估的输入—输出指标数据代入式 (7-17)，建立基于带有非阿基米德无穷小的 DEA 模型，取 $\varepsilon=10^{-6}$ 对模型进行求解，结果如表 7-10 所示。

表 7-10 带有非阿基米德无穷小的 DEA 模型求解结果

| 作战单元 \ 最优解 | λ^* | | | | S^{*-} | | S^{*+} | | | θ^* |
|------------|---------------|---------------|---------------|---------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| | λ_1^* | λ_2^* | λ_3^* | λ_4^* | S_1^{*-} | S_1^{*-} | S_1^{*+} | S_2^{*+} | S_3^{*+} | |
| A | 0 | 0 | 0.6835 | 0.1875 | 66.6078 | 0 | 0.0768 | 0 | 0 | 0.7245 |
| B | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| C | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| D | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 |

根据定理 7-3，我们作出如下判定，基本作战单元 B、C、D 为 DEA 有效，而基本作战单元 A 为非 DEA 有效。但是，基本作战单元 B、C、D 中效率更高的一个则无法进行判定。

2. 选择“2 个投入指标和 2 个产出指标”的情况

选择 2 个投入指标和保障装备平均利用率、保障装备平均完好率 2 个产出指标，将表 7-9 中 4 个基本作战单元航空保障装备效能综合评估的输入—输出指标数据代入式 (7-17)，建立基于带有非阿基米德无穷小的 DEA 模型，取 $\varepsilon=10^{-6}$ 对模型进行求解，结果如表 7-11 所示。

表 7-11 带有非阿基米德无穷小的 DEA 模型求解结果

| 作战单元 \ 最优解 | λ^* | | | | S^{*-} | | S^{*+} | | | θ^* |
|------------|---------------|---------------|---------------|---------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| | λ_1^* | λ_2^* | λ_3^* | λ_4^* | S_1^{*-} | S_2^{*-} | S_1^{*+} | S_2^{*+} | S_3^{*+} | |
| A | 0 | 0 | 0.8397 | 0 | 48.3688 | 0 | 0.0897 | 0 | 0.6716 | 0 |
| B | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 |
| C | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 |
| D | 0 | 0.2001 | 0.6577 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.7945 | 0 |

根据定理 7-3，我们作出如下判定，基本作战单元 B、C 为 DEA 有效，而基本作战单元 A、D 为非 DEA 有效。但是，基本作战单元 B、C 中效率更高的一个则无法进行判定。

7.4.4 航空保障装备效能的投影改进分析

由表 7-10 和表 7-11 可以看出，在两种情况下，基本作战单元 A 均为非 DEA 有效。为解决 DEA 有效的问题，下面以“2 个投入指标和 3 个产出指标”的情况为例，具体说明如何通过投影改进分析，改变基本作战单元 A 的投入和产出指标，使其变为 DEA 有效。

根据式 (7-18) 及表 7-10 中带有非阿基米德无穷小的 DEA 模型求解结果，可以得到基本作战单元 A 投入和产出指标的改变情况如下。

投入指标的改变情况：

$$\hat{X} = \theta^* X - S^{*-} = [757.5214 \quad 0.8782]^T \times 0.7245 - [66.6078 \quad 0]^T = [482.2165 \quad 0.636256]^T$$

产出指标的改变情况：

$$\hat{Y} = Y + S^{*+} = [0.75 \quad 0.8397 \quad 1/0.514]^T + [0.0768 \quad 0 \quad 0]^T = [0.8268 \quad 0.8397 \quad 1.9455]^T$$

基本作战单元 A 投影改进分析前后的指标对比情况如表 7-12 所示。由表 7-12 可以看出，经过投影改进分析，需要减小基本作战单元 A 的投入指标保障装备购置费用、保障装备平均配套率及产出指标保障装备平均完好率，增加产出指标保障装备平均利用率，保持产出指标保障装备机动能力指数不变。

表 7-12 基本作战单元 A 投影改进分析前后的指标对比情况

| 投入和产出指标 | 投影改进前 | 投影改进后 | 改变情况 |
|-------------------|----------|----------|------|
| 投入指标 1：保障装备购置费用 | 757.5214 | 482.2165 | 减小 |
| 投入指标 2：保障装备平均配套率 | 0.8782 | 0.636256 | 减小 |
| 产出指标 1：保障装备平均利用率 | 0.75 | 0.8268 | 增加 |
| 产出指标 2：保障装备平均完好率 | 0.8782 | 0.8397 | 减小 |
| 产出指标 3：保障装备机动能力指数 | 1.9455 | 1.9455 | 不变 |

将投影改进分析后基本作战单元 A 新的投入和产出向量代入式 (7-17)，建立基于带有非阿基米德无穷小的 DEA 模型，取 $\varepsilon=10^{-6}$ 对模型进行求解，结果如表 7-13 所示。由表 7-13 可以看出，经过投影改进，基本作战单元 A 由原来的非 DEA 有效变为 DEA 有效。

表 7-13 投影改进后的 DEA 模型求解结果

| 最优选 作战单元 | λ^* | | | | S^{*-} | | S^{*+} | | | θ^* |
|-------------|---------------|---------------|---------------|---------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| | λ_1^* | λ_2^* | λ_3^* | λ_4^* | S_1^{*-} | S_2^{*-} | S_1^{*+} | S_2^{*+} | S_3^{*+} | |
| A | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| B | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| C | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| D | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 |

7.4.5 航空保障装备效能排序

通过带有非阿基米德无穷小量 ε 的 C^2R 模型虽然可以对 4 个基本作战单元航空保障装备效能进行有效性分析，但是无法对 DEA 有效的基本作战单元进行效率比较。下面通过扩展 DEA 模型—— EC^2R 对 4 个基本作战单元的航空保障装备效能进行排序。

将表 7-9 中的数据代入式 (7-21)，建立 EC^2R 模型，取 $\varepsilon=10^{-6}$ 对模型进行求解，结果如表 7-14 和表 7-15 所示。

表 7-14 在第 1 种情况下 EC^2R 模型求解结果

| 基本作战单元 最优选 | A | B | C | D |
|---------------|---------|--------|--------|--------|
| θ^* | 0.72453 | 1.3957 | 1.5515 | 1.0723 |

表 7-15 在第 2 种情况下 EC^2R 模型求解结果

| 基本作战单元 最优解 | A | B | C | D |
|---------------|---------|--------|--------|---------|
| θ^* | 0.67159 | 1.0338 | 1.5515 | 0.79447 |

由表 7-14 和表 7-15 可以看出，在两种情况下，4 个基本作战单元航空保障装备的效能比较结果均为：基本作战单元 C 最高、基本作战单元 B 次之、基本作战单元 D 较低、基本作战单元 A 最低。

总结与展望

8.1 内容总结

航空保障装备是作战单元实施航空装备保障的重要物质资源，是制约航空装备作战完好、任务完成、寿命周期费用的关键因素之一。面对联合作战背景下航空兵多机种、远程远海作战训练任务需求，为提高航空装备作战保障能力和航空保障装备体系建设水平，有效解决航空保障装备通用化、综合化、小型化水平不高，配备不精确，使用管理不科学等问题，急需从航空保障装备系统工程的角度，系统研究航空保障装备论证、设计、研制、生产、采购、使用、退役报废及管理等问题，确保使用阶段能以低寿命周期费用获取序列配套、精干敏捷的航空保障装备系统。

本书以系统工程方法论为指导，运用定性与定量相结合、理论与实践相结合、需求分析与效能评估相结合的思路方法，界定航空保障装备系统工程的概念内涵，建立航空保障装备系统工程过程模式，并重点对航空保障装备体系结构设计、型谱优化、数量配置、效能评估等典型问题进行深入研究，为航空保障装备全系统全寿命管理研究奠定重要的理论与实践基础。

本书的创新性工作主要体现在以下几个方面。

(1) 为提升航空装备全系统全寿命管理水平，针对航空保障装备的特点，结合军民融合、装备采办、实战化训练、精细化管理等领域的发展趋势，提出航空保障装备型谱化发展论证、联合与竞争研制、精细化使用管理、实战化运用等模式，优化航空保障装备系统工程过程模式。

(2) 针对航空保障装备需求难确定的问题，借鉴 DoDAF 2.0 视图模型和能力需求论证方法，提出基于视图分析的航空保障装备体系结构设计方法，并以信息化航空维修保障装备体系结构设计为例，对体系结构具体的设计过程进行详细阐述。

(3) 针对航空保障装备型谱方案评估复杂、组合多、优化效率低等问题，提出基于重要度评估和多种群遗传算法的型谱优化方法。该方法在构建航空保障装备型谱重要度评估指标体系的基础上，通过基于灰色群组聚类 and 熵权原理的组合赋权方法确定评估指标权重，

通过计算型谱重要度综合评估值（型谱优先级）实现型谱优化方案的初步筛选；最后以效费比最大为优化目标，基于多种群遗传算法实现型谱优化方案的最终决策。

（4）针对航空保障装备数量配置不合理的问题，在系统分析影响因素的基础上，区分航空保障装备不同寿命周期阶段、不同职能管理层级，建立航空保障装备数量配置的一般流程；系统分析典型航空保障装备数量配置方法的基本原理、应用过程、适用范围与应用案例，并结合航空保障装备的类型、特点和任务要求，提出航空保障装备数量配置方法选择的逻辑决策过程。

（5）针对规划阶段航空保障装备方案效能评估结果不确定、验证滞后等特点，提出基于仿真的规划阶段航空保障装备方案效能评估流程框架，系统研究仿真评估模型和算法策略，并通过具体实例分析航空保障装备方案效能仿真评估过程。

（6）针对使用阶段航空保障装备效能综合评估问题，建立使用阶段航空保障装备效能综合评估流程和评估指标体系，给出各评估指标的计算方法，提出基于 DEA 的使用阶段航空保障装备效能综合评估策略。

8.2 研究展望

航空保障装备系统工程是系统工程科学和方法论在装备保障领域应用的一个全新课题，时间维度广、涉及内容多、难度较大。本书虽对航空保障装备系统工程过程模式和关键技术方法进行了一定程度的理论与实践探索，但该领域的研究任务还很艰巨，需要进一步深化研究。其重点内容包括以下几点。

（1）航空保障装备体系结构设计方面。针对“任务需求—能力需求—保障装备需求”的逻辑映射过程，下一步要借鉴系统工程中系统结构模型的思想，运用解释结构模型技术（ISM），对相互关联依赖的任务、能力、保障装备进行结构分析，为实现航空保障装备体系层次化、多任务功能化，压缩航空保障装备型号种类奠定基础。

（2）航空保障装备型谱优化方面。本书提出的型谱优化方法在解决单一类型保障装备型谱优化方面具有较强的适应性。下一步将在此基础上，重点研究多型号保障装备、多类型保障装备混合的型谱综合规划模型方法。为此，需要对评估指标体系、优化算法选择和参数设置进行系统设计和完善。此外，还需要将费用可控的单目标优化问题扩展到费用和 risk 可控的多目标优化问题。

（3）航空保障装备数量配置方面。下一步将重点针对典型作战训练任务条件下高价值、高使用频率航空保障装备的精确配置需求，深入分析航空保障装备使用和保障特点，建立更为精确、实用、通用的数量配置模型；同时要借鉴装备保障军民融合发展的创新思想，在统筹考虑前推机场建制保障单位预置情况的基础上，尝试依托任务范围内的地方工业部门（如航空保障装备制造厂、修理厂等）、民航等机构，研究航空保障装备协同配置的问题。

（4）航空保障装备效能评估方面。在规划阶段，重点从保障方案设计优化的角度，研究在多保障级别、多机种保障条件下，航空保障装备方案的评估与决策问题；在使用阶段，重点从保障效益和体系贡献率的角度，分析航空保障装备对系统效能的贡献率，找出影响系统效能的薄弱环节。

（5）航空保障装备辅助决策支持平台方面。为重点解决航空保障装备决策定性依赖经验的问题，将重点结合作战使用与管理需求，以定量评估和优化模型为核心，研究航空保障装备辅助决策支持平台，集成航空保障装备“三化”辅助决策、航空保障装备机动携行方案生成、航空保障装备使用效能效益评估等功能模块。

参考文献

- [1] 空军装备部. 空军航空维修保障装备管理规定, 2007.
- [2] GJB 5967—2007. 保障设备规划与研制要求[S]. 北京: 中国人民解放军总装备部, 2007.
- [3] 空军军语管理委员会. 中国人民解放军空军军语[M]. 北京: 蓝天出版社, 2012.
- [4] 中国空军百科全书编审委员会. 中国空军百科全书[M]. 北京: 航空工业出版社, 2005.
- [5] 汪应洛. 系统工程[M]. 5 版. 北京: 机械工业出版社, 2016.
- [6] 陈学楚, 等. 装备系统工程[M]. 2 版. 北京: 国防工业出版社, 2008.
- [7] 刘忠, 等. 军事系统工程[M]. 北京: 国防工业出版社, 2014.
- [8] 宋太亮. 装备保障性系统工程[M]. 北京: 国防工业出版社, 2008.
- [9] 郑东良. 航空维修管理[M]. 北京: 国防工业出版社, 2006.
- [10] 秦寿康. 综合评价原理与应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2003.
- [11] 单志伟, 等. 装备综合保障工程[M]. 北京: 国防工业出版社, 2008.
- [12] 赵经成, 祝华远, 王文秀. 航空装备技术保障运筹分析[M]. 北京: 国防工业出版社, 2010.
- [13] 于永利, 张柳. 装备保障工程技术型谱[M]. 北京: 国防工业出版社, 2015.
- [14] 刘思峰, 党耀国, 方志耕, 等. 灰色系统理论及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- [15] 郭亚军. 综合评价理论、方法及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2007.
- [16] 徐吉辉, 谢文俊. 综合评价理论、方法与军事应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2014.
- [17] 郁磊, 史峰, 王辉, 等. MATLAB 智能算法 30 个案例分析[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2015.
- [18] 于永利, 张波. 装备作战单元维修保障资源预测技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2015.
- [19] 秦天宝, 王岩峰. 面向应用的仿真建模与分析——使用 ExtendSim[M]. 北京: 清华大学出版社, 2009.
- [20] 穆歌. 基于体系结构技术的保障装备体系需求分析方法研究[D]. 北京: 装备指挥技术学院, 2010.
- [21] 左德华. 船艇保障装备设备体系保障效能评估系统研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2005.
- [22] 王超. 军用飞机大修效率评估及流程优化[D]. 西安: 空军工程大学, 2015.
- [23] 吴澄, 刘宇晨, 杜康, 等. 面向并行工程的武器装备可靠性设计研究[J]. 装备制造技术, 2015, 3: 63-66.
- [24] 田留宗, 吕瑛洁, 廖崇尧. 导弹武器保障装备体系综合论证研究[J]. 科技研究, 2010, 26 (1): 41-43.
- [25] 李运祯, 赵益, 胡林, 等. 基于能力的技术保障装备体系建设问题[J]. 四川兵工学报, 2013, 34 (3): 113-115.
- [26] 王乃超, 康锐, 王禹. 基于产品维修策略的保障设备需求量计算模型研究[J]. 系统工程与电子技术, 2009, 31 (5): 1266-1269.
- [27] 郭霖瀚, 康锐, 文佳. 以保障活动为中心的装备保障资源数量预测[J]. 航空学报, 2009, 30 (5): 919-924.
- [28] 孙蛟, 虞健飞, 辛文逵. 基于仿真的军用飞机保障设备利用率计算模型[J]. 系统仿真学报, 2009, 21 (11): 3219-3221.
- [29] 王严, 马麟, 文佳, 等. 考虑保障设备故障的装备维修保障模型[J]. 北京航空航天大学学报, 2012, 38 (1): 123-127.
- [30] 杜慧滨, 顾培亮, 郝海. 基于 EC^2R 模型的决策单元规模收益的判定[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2005, 37 (3): 329-331.
- [31] 沈慧, 明新国, 严隽琪, 等. 产品型谱管理技术初探[J]. 机械设计与研究, 2008, 24 (2): 72-77.

- [32] 朱毅麟. 技术成熟度对航天器研制进度的影响[J]. 航天器工程, 2009 (2): 13-17.
- [33] 郭宁, 任江涛, 赵一婧. 基于本体的航天产品型谱模型构建与系统实现[J]. 工业技术创新, 2014, 1 (3): 315-319.
- [34] 高飞, 梅凯城, 张元鸣, 等. 基于优先数系的产品族型谱规划模型[J]. 计算机集成制造系统, 2015, 21 (3): 571-575.
- [35] 孙栋, 顾永治, 杨志坚, 等. 大型动员装备加改装器材系列型谱编制[J]. 军事交通学院学报, 2015, 17 (1): 27-30.
- [36] 孟祥辉, 蔡永涛. 基于 0-1 整数规划的舰船武器保障设备配套优化建模[J]. 兵器装备工程学报, 2016, 37 (4): 41-43.
- [37] 郭红芬, 刘福胜. 利用排队模型优化保障设备数量研究[J]. 装甲兵工程学院学报, 2005, 19 (1): 29-31.
- [38] 钱潜, 单志伟, 刘福胜, 等. 基于排队论的一体化装备保障设备数量确定方法[J]. 装甲兵工程学院学报, 2015, 29 (5): 18-21.
- [39] 刘瑞, 康锐, 张侦英, 等. 装备研制阶段保障设备配置效率预测模型[J]. 系统工程与电子技术, 2011, 33 (5): 1040-1044.
- [40] 罗先敏, 张忠宜, 谢立军, 等. 多机种保障中的四站装备需求仿真[J]. 兵工自动化, 2009, 28 (8): 45-48.
- [41] 张侦英, 康锐, 王乃超, 等. 典型情况下保障设备满足率计算模型[J]. 计算机集成制造系统, 2010, 16 (10): 2206-2210.
- [42] 张阔. 着眼提高保障效能改革航空保障装备研发模式[J]. 空军装备, 2006 (7): 14-15.
- [43] 陈黎, 李红军. 促进装备研制竞争问题研究[J]. 中国军转民, 2013, 1: 55-57.
- [44] 蔡忠义, 陈云翔, 徐吉辉, 等. 基于熵权的群组灰色聚类决策法[J]. 电光与控制, 2012, 19 (3): 44-46.
- [45] 马卫民, 吴凌霄. 基于改进的多种群遗传算法求解工序可拆分车间调度问题[J]. 系统管理学报, 2016, 25 (5): 888-894.
- [46] 吴辉建. 空军航空保障装备发展建设的几点思考[J]. 空军装备, 2006 (8): 3-5.
- [47] 王帅, 王亚彬. ExtendSim 在维修资源仿真建模中的应用[J]. 军械维修工程研究, 2012, 29 (3): 8-11.
- [48] 周辅疆, 顾赞, 王斌, 等. 基于粒子群算法维修保障单元优化配置[J]. 火力与指挥控制, 2016, 41 (5): 157-160.
- [49] 何桢. 航空保障设备中随机设备与随机工具管理问题研究[C]. 首届航空保障设备发展论坛, 2017: 42-46.
- [50] 张东方, 刘晓媛, 赵瑞贤. 军用飞机地面保障设备标准体系建设的思考[C]. 首届航空保障设备发展论坛, 2017: 66-70.
- [51] DoD. Technology Readiness Assessment (TRA) Deskbook[R]. U. S. A. Department of Defense, 2009.
- [52] Dyer M E, Proll L G. On the Validity of Marginal Analysis for Allocating Servers in M/M/c Queues[J]. Management Science, 1977, 23 (9): 1019-1022.
- [53] Alfredsson P. Optimization of multi-echelon repairable item inventory systems with simultaneous location of repair facilities[J]. European Journal of Operational Research, 1997, 99: 584-595.
- [54] Diaz A, Fu M C. Models for multi-echelon repairable item inventory systems with limited repair capacity[J]. European Journal of Operational Research, 1997, 97: 480-492.